

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Luka Čalušić

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Nenad Ferdelji, dipl. ing.

Student:

Luka Čalušić

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc. Nenadu Ferdeljiju koji mi je omogućio izradu diplomskog rada u suradnji s tvrtkom Sinitech d.o.o., ustupio mi potrebne materijale te me stručno i strpljivo vodio i savjetovao kroz rad. Također, zahvaljujem se Siniši Gulinu i Borisu Ferdeljiju iz tvrtke Sinitech d.o.o. koji su mi stručnim savjetima znatno pomogli u izradi diplomskog rada.

Veliku zahvalu iskazujem svojoj obitelji, prijateljima i djevojci na podršci za vrijeme izrade ovog diplomskog rada.

Luka Čalušić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: Luka Čalušić

Mat. br.: 0035187091

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Jednostupanjska uparivačka stanica s mlaznim termokompresorom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Single effect evaporation plant with steam jet thermocompressor**

Opis zadatka:

Potrebno je projektirati jednostupanjsku uparivačku stanicu s mlaznim termokompresorom i koncentrično smještenim separatorom za ugušćivanje soka od rajčice s 5 % na 30 % suhe tvari. U isparivaču sok od rajčice struji uzlazno, a uparivanjem nastaje 500 kg/h supare koja se dijelom kondenzira u indirektnom kondenzatoru.

Na raspolaganju stoji suhozasićena vodena para tlaka 6 bar i dovoljna količina rashladne vode temperature 15 °C.

U okviru rada potrebno je izraditi:

- a) shemu spajanja uparivačke stanice,
- b) potpuni termodinamički proračun cjelokupne uparivačke stanice,
- c) proračun čvrstoće glavnih dijelova stanice,
- d) radioničke crteže isparivača sa separatorom, mlaznog termokompresora i kondenzatora.

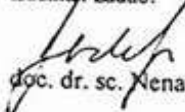
U radu navesti korištenu literaturu te eventualnu pomoć mentora.

Zadatak zadan:
17. studenog 2016.


Rok predaje rada:
19. siječnja 2017.

Predviđeni datumi obrane:
25., 26. i 27. siječnja 2017.

Zadatak zadao:


doc. dr. sc. Nenad Ferdelji

Predsjednica Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
1.1. Općenito o uparivačima	1
1.2. Tipovi uparivača	2
1.3. Tehnike uparivanja za postizanje energetske učinkovitosti	4
1.3.1. Višestupanjsko uparivanje	4
1.3.2. Termokompresija supare.....	4
1.3.3. Mehanička kompresija supare.....	5
1.4. Utjecaj karakteristika otopine na izbor procesa	6
1.5. Prerada rajčice.....	7
2. UPARIVAČI S PRISILNOM CIRKULACIJOM.....	8
3. OSNOVE ISPARIVANJA	11
3.1. Isparivanje u mirujućoj kapljevini (<i>Pool boiling</i>).....	12
3.2. Isparivanje u struji kapljevine (<i>Flow boiling</i>).....	13
4. DVOFAZNI TOK.....	15
4.1. Oblici strujanja.....	16
5. PRIJELAZ TOPLINE ISPARIVANJEM U STRUJI KAPLJEVINE.....	19
5.1. Gungor-Winterton model.....	21
5.2. Model iz VDI Heat Atlas-a	22
5.3. Shah model.....	23
6. TERMODINAMIČKI PRORAČUN.....	25
6.1. Bilanca mase sustava	26
6.2. Bilanca energije uparivača	28
6.3. Bilanca energije termokompresora (mlazni ejektor).....	29
6.4. Termodinamički proračun uparivača	29
6.4.1. Svojstva sudionika	30
6.4.2. Odabir promjera i broja cijevi.....	31
6.4.3. Promjer cijevne stjenke	31
6.4.4. Koeficijent prijelaza topline na strani otopine	32
6.4.5. Koeficijent prijelaza topline na strani ogrjevnice pare	34
6.4.6. Koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu cijevi.....	35
6.4.7. Površina izmjene topline.....	35
6.5. Termodinamički proračun ejektora	36
6.6. Termodinamički proračun kondenzatora	40

6.6.1.	Bilanca kondenzatora	41
6.6.2.	Svojstva sudionika	42
6.6.3.	Odabir cijevi.....	43
6.6.4.	Broj cijevi.....	43
6.6.5.	Promjer cijevne stjenke	43
6.6.6.	Koeficijent prijelaza topline na strani vode	44
6.6.7.	Koeficijent prijelaza topline na strani supare.....	45
6.6.8.	Koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu cijevi.....	45
6.6.9.	Površina izmjene topline	45
7.	PRORAČUN ČVRSTOĆE.....	47
7.1.	Proračun čvrstoće uparivača	48
7.1.1.	Proračun cilindričnog plašta.....	48
7.1.2.	Proračun priključaka na plaštu	50
7.1.3.	Proračun podnice	51
7.1.4.	Proračun priključka ulaza otopine.....	53
7.1.5.	Proračun cijevne stjenke	53
7.1.6.	Proračun izreza na plaštu	56
7.2.	Proračun čvrstoće separatora	57
7.2.1.	Proračun cilindričnog plašta.....	57
7.2.2.	Proračun podnica	60
7.2.3.	Proračun priključka izlaska koncentrata	63
7.2.4.	Proračun priključka izlaska supare	63
7.3.	Proračun čvrstoće kondenzatora	64
7.3.1.	Proračun cilindričnog plašta.....	64
7.3.2.	Proračun priključaka na plaštu	66
7.3.3.	Proračun podnica	67
7.3.4.	Proračun priključka rashladne vode.....	68
7.3.5.	Proračun vijaka	69
7.3.6.	Proračun ravne priрубnice za privarivanje	72
7.3.7.	Proračun cijevne stjenke	73
7.3.8.	Proračun izreza na plaštu	76
8.	PRORAČUN PADA TLAKA	78
8.1.	Pad tlaka uparivača na tlačnoj strani	78
8.2.	Pad tlaka uparivača na usisnoj strani	79
8.3.	Odabir pumpe.....	81
	ZAKLJUČAK	82
	LITERATURA.....	83
	PRILOZI.....	84

POPIS SLIKA

Slika 1.	Jedinična operacija uparivanja	1
Slika 2.	Primjer filmskog uparivača i uparivača s prisilnom cirkulacijom	3
Slika 3.	Dvostupanjska izvedba [3]	4
Slika 4.	Izvedba s termokompresijom supare [3]	5
Slika 5.	Izvedba s mehaničkim kompresorom [3]	5
Slika 6.	Shema proizvodnje soka od rajčice	7
Slika 7.	Uparivač s prisilnom cirkulacijom	8
Slika 8.	Termokompresor (mlazni ejektor).....	10
Slika 9.	Oblici isparivanja [2]	11
Slika 10.	Prikaz toplinskog opterećenja ogrjevnice plohe [2]	12
Slika 11.	Isparavanje u struji kapljevine u jednoliko grijanoj vertikalnoj cijevi [4]	14
Slika 12.	Režimi dvofaznog strujanja [5]	17
Slika 13.	Razvoj dvofaznog toka u vertikalnoj isparivačkoj cijevi [5]	17
Slika 14.	Mapa dvofaznog toka [5]	18
Slika 15.	Proces isparavanja u vertikalnoj cijevi prema Steiner-Taborek modelu [4]	20
Slika 16.	Shematski prikaz uparne stanice	25
Slika 17.	Usporedba koeficijenata prijelaza topline po visini cijevi	34
Slika 18.	Prikaz procesa u h,s dijagramu	36
Slika 19.	Skica ejektora	38

POPIS TABLICA

Tablica 1. Odabir uparivača na temelju karakteristika proizvoda.....	3
Tablica 2. Rezultati proračuna koeficijenta prijelaza topline na strani otopine	33

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

BROJ CRTEŽA	Naziv iz sastavnice
100	Kondenzator
200	Uparivač sa separatorom
300	Ejektor
500	Shema uparne stanice

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2	Površina poprečnog presjeka
c	$\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$	Specifični toplinski kapacitet
c_{st}	$\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$	Specifični toplinski kapacitet suhe tvari rajčice
c_w	$\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$	Specifični toplinski kapacitet vode
D_s	m	Vanjski promjer plašta
D_u	m	Unutarnji promjer plašta
d_v	m	Vanjski promjer cijevi
d_u	m	Unutarnji promjer cijevi
E	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Modul elastičnosti
g	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Ubrzanje sile teže
H	m	Visina
h	$\frac{\text{J}}{\text{kg}}$	Entalpija
h_a	$\frac{\text{J}}{\text{kg}}$	Entalpija koncentrata rajčice
h_d	$\frac{\text{J}}{\text{kg}}$	Entalpija svježeg pare
h_g	$\frac{\text{J}}{\text{kg}}$	Entalpija grijevnog pare
h_k	$\frac{\text{J}}{\text{kg}}$	Entalpija grijevnog pare
h_r	$\frac{\text{J}}{\text{kg}}$	Entalpija kondenzata grijevnog pare
h_w	$\frac{\text{J}}{\text{kg}}$	Entalpija supare
k	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$	Koeficijent prolaza topline
L	m	Duljina cijevi

n	m	Broj cijevi
Nu		Nusseltov broj
p	Pa	Tlak
Δp	Pa	Pad tlaka
p_{kr}	Pa	Kritični tlak
Pr		Prandtlov broj
q	$\frac{W}{m^2}$	Gustoća toplinskog toka
q_m	$\frac{kg}{s}$	Maseni protok
q_{ma}	$\frac{kg}{s}$	Maseni protok koncentrata rajčice
q_{md}	$\frac{kg}{s}$	Maseni protok zasićene pare
q_{mr}	$\frac{kg}{s}$	Maseni protok svježeg soka rajčice
q_{mST}	$\frac{kg}{s}$	Maseni udio suhe tvari
q_{mwg}	$\frac{kg}{s}$	Maseni protok supare za predgrijanje
q_{mwR}	$\frac{kg}{s}$	Maseni protok neiskorištene supare
R	m	Radijus kalote
r	m	Radijus torusnog dijela
Re		Reynoldsov broj
R_e	$\frac{N}{mm^2}$	Granica razvlačenja
R_m	$\frac{N}{mm^2}$	Vlačna čvrstoća
s	m	Debljina stijenke cijevi
v_1	m^3/kg	Specifični volumen pogonske pare

v_2	m^3/kg	Specifični volumen pare na izlazu iz mlaznice
v_4	m^3/kg	Specifični volumen pare u komori miješanja
v_5	m^3/kg	Specifični volumen pare na izlazu iz difuzora
w	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Brzina strujanja
w_2	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Brzina na izlazu iz mlaznice ejektora
w_4	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Brzina na izlazu iz komore miješanja
w_5	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Brzina na izlazu iz difuzora
α	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$	Koeficijent prijelaza topline
ξ_r	$\frac{\text{kg}_{\text{tvari}}}{\text{kg}_{\text{otopine}}}$	Maseni udio suhe tvari na ulazu
ξ_a	$\frac{\text{kg}_{\text{tvari}}}{\text{kg}_{\text{otopine}}}$	Maseni udio suhe tvari na izlazu
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura
ϑ_a	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura koncentrata
ϑ_r	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura sirove otopine
$\Delta\vartheta_{\text{dep}}$	$^{\circ}\text{C}$	Temperaturna depresija
$\Delta\vartheta_{\text{gr}}$	$^{\circ}\text{C}$	Temperaturna razlika ogrjevnice pare i otopine
λ	$\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	Koeficijent toplinske provodnosti
μ	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	Dinamička viskoznost
ρ	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Gustoća
Φ	W	Toplinski tok

SAŽETAK

U sklopu diplomskog rada projektirana je jednostupanjska uparivačka stanica s prisilnom cirkulacijom za ugušćivanje soka od rajčice s mlaznim termokompresorom i shell&tube vertikalnim kondenzatorom. Dan je pregled vrsta uparivača, opisan je sam proces i rad uparivačke stanice i njenih komponenti. Izrađen je potpuni termodinamički proračun cjelokupne uparivačke stanice, proračun čvrstoće glavnih dijelova stanice te shema spajanja uparivačke stanice. Rad sadrži radioničke crteže uparivača sa separatorom, mlaznog termokompresora i kondenzatora.

Ključne riječi: uparivanje; kondenzator; separator; izmjenjivač topline; termodinamički proračun; proračun čvrstoće; termokompresor; uparivanje soka rajčice

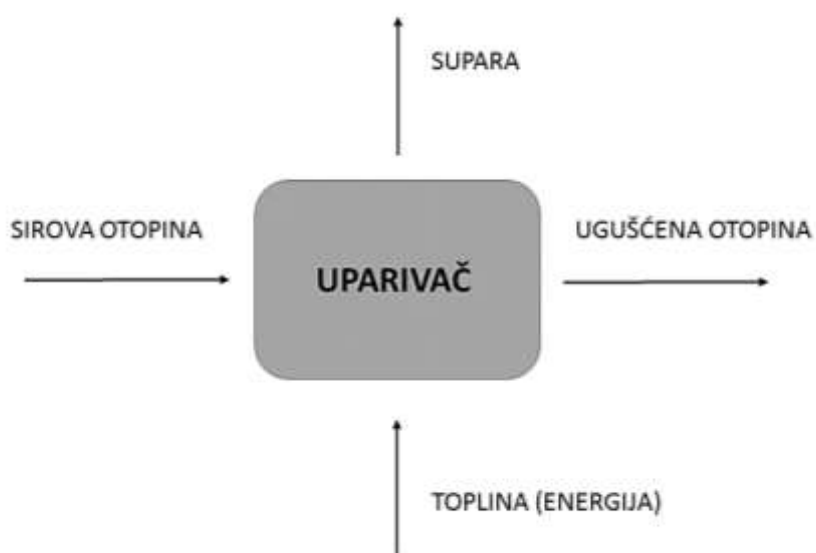
SUMMARY

The basis of this paper was to design single effect evaporation plant with thermocompression for tomato juice concentration. Complete thermodynamic calculation of the overall evaporation station was conducted, as well as strength calculation of the main parts of the station. Paper contains manufacturing drawings, assembly drawing and regulation scheme.

Key words: evaporation; condenser; separator; heat exchanger; thermodynamic calculation; structural calculation; thermocompressor; tomato juice evaporation

1. UVOD

Uparivanje je proces uklanjanja otapala zagrijavanjem, najčešće vode, u obliku pare iz otopine. Svrha uparivanja je povećanje masenog udjela ξ suhe tvari odnosno ugušćivanje sirove otopine prilikom kojeg je supara neželjeni produkt. Zbog uvriježenog naziva, u daljnjem tekstu, maseni udio ξ će se nazivati koncentracija. Uparivanje se koristi za obradu hrane, mliječnih proizvoda, žitaričnih napitaka, škrobi, voćnih sokova, kave, šećera, paste i koncentrata od povrća, začina, jestivih ulja, umaka, farmaceutskih proizvoda, kemikalija, itd.



Slika 1. Jedinična operacija uparivanja

1.1. Općenito o uparivačima

U uparivačima latentna toplina kondenzacije ogrjevnice pare se prenosi na sirovu otopinu u svrhu postizanja temperature zasićenja i isparavanja otapala. Nastala supara se zatim uklanja s površine otopine, a koristan proizvod je ugušćena otopina.

Ogrjevni medij je najčešće zasićena vodena para, vrela kapljevina ili dimni plinovi iz drugih operacija.

Konstrukcija uparivača ima dvije glavne uloge koje valja ispuniti uz što učinkovitije iskorištenje energije:

- Prijenos topline
- Separacija supare od otopine

Da bi uparivač bio učinkovit mora zadovoljiti slijedeće:

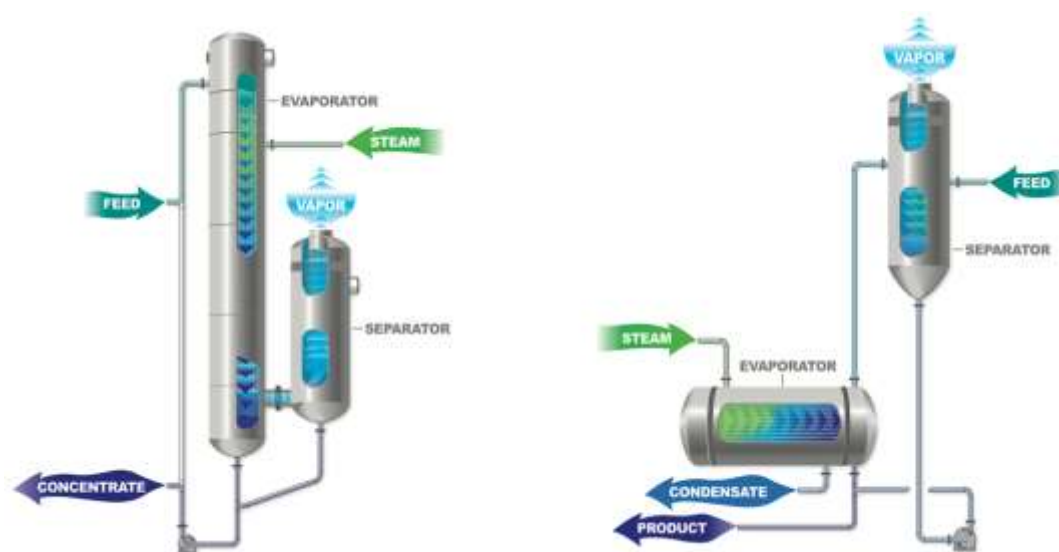
- a) Prijenos velike količine topline na otopinu preko minimalne izmjenjivačke površine što određuje vrstu, veličinu i cijenu uparivača.
- b) Odvajanje supare sa što jednostavnijim uređajima
- c) Ponovno iskorištenje supare kao ogrjevnog medija.

Uparivač mora ispuniti uvjete koje nameće proizvod. Faktori koje treba uzeti u razmatranje su kvaliteta proizvoda, degradacija proizvoda, taloženje, pjenjenje, zastoje, korozija te potreba za posebnim tipom konstrukcije.

1.2. Tipovi uparivača

Osnovni tipovi uparivača koji imaju različite izvedbe:

- Otvoreni kotao (šaržni)
- Uparivač s prirodnom cirkulacijom
- Uparivač s prisilnom cirkulacijom
- Filmski uparivač (uzlazni ili padajući film)
- Uparivač s centrifugalnim formiranjem filma
- Pločasti uparivač



Slika 2. Primjer filmskog uparivača i uparivača s prisilnom cirkulacijom

Tablica 1. Odabir uparivača na temelju karakteristika proizvoda

Tip uparivača	Čistoća	Velik kapacitet	Krutine, kristali	Formiranje naslaga	Pjenjenje	Temperaturna osjetljivost	Velika viskoznost
Šaržni	✓						✓
Horizontalne cijevi	✓						
Vertikalne kratke cijevi	✓						
Vertikalne duge cijevi	✓	✓					
Filmski uzlazni	✓	✓			✓		
Filmski padajući	✓	✓	✓		✓	✓	
Prisilna cirkulacija	✓	✓	✓	✓	✓		
Pločasti	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Centrifugalni	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

1.3. Tehnike uparivanja za postizanje energetske učinkovitosti

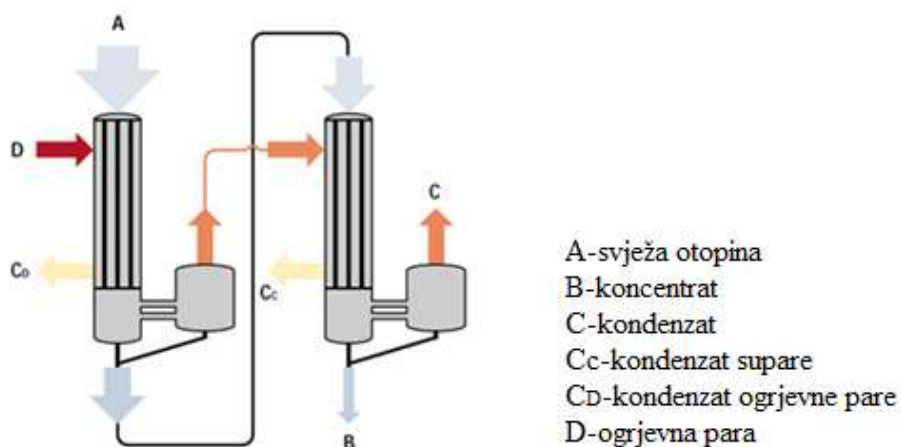
Operativni troškovi uparnog postrojenja u velikoj mjeri su određeni potrošnjom energije.

U daljnjem tekstu dan je opis prema literaturi [3].

1.3.1. Višestupanjsko uparivanje

Kod višestupanjskog uparivanja supara nastala iz prvog stupnja se koristi kao ogrjevni medij za uparivanje otopine u drugom stupnju. Time se potrošnja energije smanjuje i do 50%.

Daljnjim stupnjevanjem potrošnja energije se još smanjuje. Da bi to bilo izvedivo, svaki idući stupanj mora biti na nižem tlaku od prethodnog.



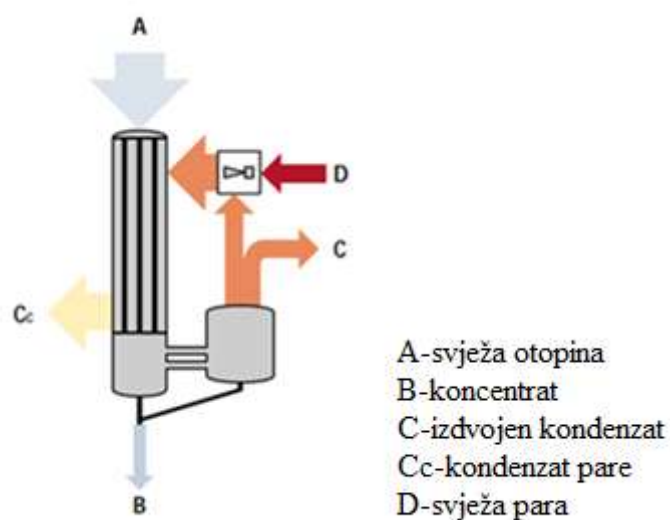
Slika 3. Dvostupanjska izvedba [3]

1.3.2. Termokompresija supare

Kako bi se smanjila potrošnja energije, dio supare se komprimira s visokotlačnom parom u termokompresoru te se tako pomiješana para koristi za daljnje zagrijavanje otopine.

Termokompresor nema pokretnih dijelova i stoga ne podliježe trošenju što osigurava maksimalnu pogonsku sigurnost.

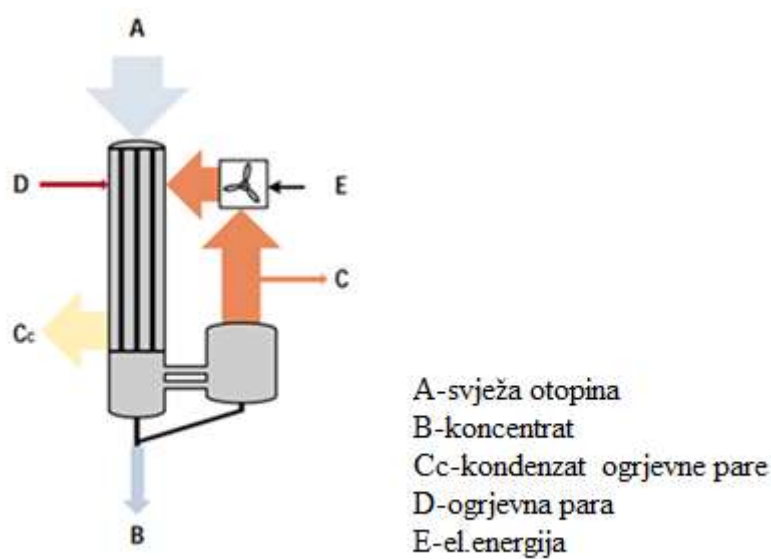
Termokompresija supare može dati istu uštedu pare tj. energije kao dodatni stupanj uparivanja. Najčešće se koristi kod jednostupanjskih uparivača ili na prvom stupnju kod dvostupanjskih i trostupanjskih uparivača.



Slika 4. Izvedba s termokompresijom supare [3]

1.3.3. Mehanička kompresija supare

Sva supara se komprimira u mehaničkom kompresoru te se ponovno koristi kao ogrjevni medij. Zbog jednostavnosti, manjih dimenzija, lakog održavanja te iskoristivosti najčešće se koriste centrifugalni ventilatori za kompresiju supare.



Slika 5. Izvedba s mehaničkim kompresorom [3]

1.4. Utjecaj karakteristika otopine na izbor procesa

Na odabir uparivača utječu svojstva i karakteristike otopine koja se koncentrira.

U daljnjem tekstu dan je opis prema literaturi [1].

Temperaturna depresija

Temperaturna depresija je povišenje vrelišta otopine u odnosu na čisto otapalo prilikom povećanja udjela suhe tvari u otopini. Mehanička kompresija supare nije moguća ako je iznos temperaturne depresije veći od 3 °C jer mehanički kompresori rade pri mali kompresijskim omjerima što rezultira i malim temperaturnim razlikama.

Viskoznost

Prilikom uparivanja otopina viskoznosti većih od 300 mPas ne mogu se koristiti filmski uparivači s padajućim filmom nego se prelazi na prisilnu cirkulaciju koju ostvaruje pumpa.

Taloženje

Ako zaprljanje izmjenjivačke površine nastane u kratkom vremenskom periodu, učinak takvih uparivača naglo opada jer se zbog formiranih naslaga povećava otpor izmjene topline. U tom slučaju prelazi se na uparivače s prisilnom cirkulacijom.

Temperaturna osjetljivost

Mnoge kemikalije i proizvodi, posebno u prehrambenoj industriji, sklone su degradaciji na povišenim temperaturama stoga treba obratiti pozornost na vrijeme zadržavanja kao i temperaturu proizvoda. Ovaj problem ograničava raspon temperatura kod višestupanjskih sustava.

Pjenjenje

Neke su otopine sklone pjenjenju prilikom uparivanja. Pjenjenje može uzrokovati pretjerano zarobljavanje kapljica otopine, a uzrok nastanka su najčešće otopljeni plinovi u otopini, curenje zraka.

1.5. Prerada rajčice

Rajčica je povrće vrlo pogodno za preradu, a zbog visokog sadržaja kiselina uspješno se prerađuje na temperaturama do 100°C. Uporabom prikladnih mehanizama branja, ambalaže i uvjeta transporta, smanjuje se rizik oštećenja ploda. Prerađevine od rajčice su: pasirana rajčica, koncentrat rajčice, sok od rajčice, kečap, dehidrirani proizvodi od rajčice i ostali proizvodi.

Pasirana rajčica je proizvod koji se dobiva pasiranjem tijekom kojega se odvaja kožica i sjemenke, grubi dijelovi tkiva te se usitnjava i djelomično homogenizira. Pasirana rajčica služi kao temelj za proizvodnju koncentrata rajčice, soka od rajčice, kečapa i drugih proizvoda.

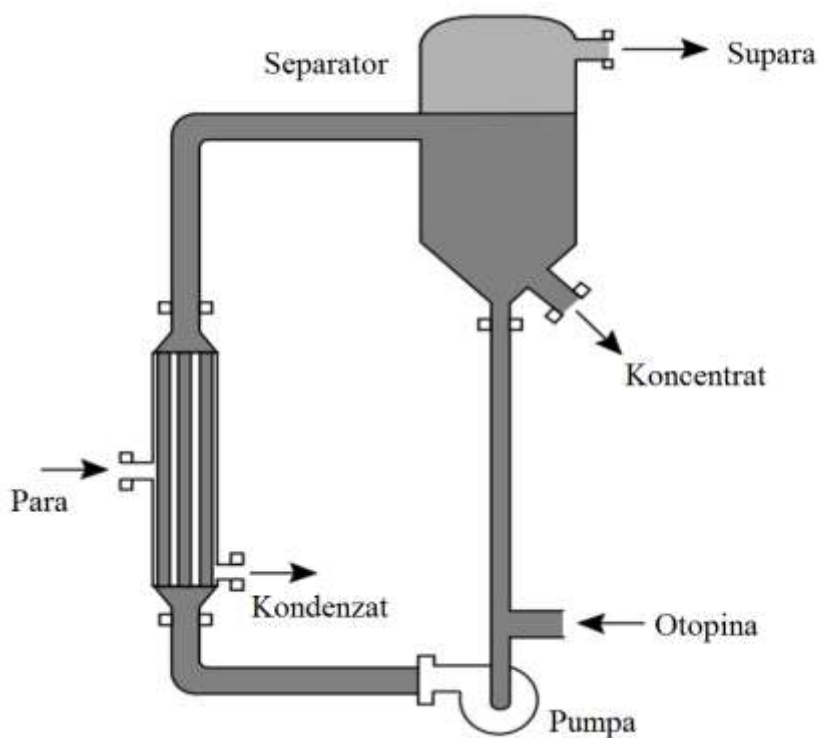
Koncentrat je prema definiciji proizvod dobiven uparivanjem soka proizvedenog pasiranjem zdrobljenih i toplinski obrađenih plodova rajčice. Prihvat i doprema sirovine do stroja za pranje i probiranje odvija se vodenim transportom (kanalima, žljebovima) ili prijenosnim vrpčama. Kod pranja se obično kombinira namakanje uz barbotiranje vode i ispiranje na vrpci s tuševima. Barbotiranje je proces propuhivanje tekućeg medija mjehurićima plina, najčešće zraka. Zatim se probrani plodovi podvrgavaju drobljenju. Danas se najčešće sjemenke uklanjaju prije toplinske obrade. Uklanjanjem sjemenki prije toplinske obrade izbjegava se prijelaz nepoželjnih tvari kao što su smolaste tvari i ulja iz sjemenki u sok i gotovi proizvod. Predgrijavanjem pulpe dolazi do omekšanja tkiva što olakšava pasiranje i povećava iskorištenje suhe tvari te se inaktiviraju enzimi i djelomično uništavaju mikroorganizmi. Pasiranjem se postiže odvajanje kožica, grubih dijelova tkiva, usitnjavanje i djelomična homogenizacija soka. Takva pasirana i zagrijana rajčica ulazi u uparivač gdje se ugušćuje i nastaje koncentrat rajčice koji se dalje pasterizira.



Slika 6. Shema proizvodnje soka od rajčice

2. UPARIVAČI S PRISILNOM CIRKULACIJOM

Uparivači s prisilnom cirkulacijom koriste se za obradu otopina i tekućina koje su podložne taloženju i kristalizaciji kao i za otopine s visokom viskoznosti. Otopina, koja može imati više prolaza, cirkulira kroz izmjenjivač topline odnosno isparivačke cijevi s relativno niskim isparavanjem po prolazu. Cilj prisilne cirkulacije je povećanje masenog protoka otopine i povrat otopine koja se obavlja izvan područja izmjenjivanja topline. Za postizanje prisilne cirkulacije najčešće se koriste aksijalne pumpe, a brzine koje se postižu u cijevima su 1-5 m/s.



Slika 7. Uparivač s prisilnom cirkulacijom

Promjer cijevi je obično između 25 i 50 mm dok je duljina cijevi 3 do 6 metara.

Cijena ovakvih uparivača je veća od filmskih uparivača zbog potrebe za dodatnim recirkulacijskim cjevovodom i pumpom koja dakako povisuje i operativne troškove.

PREDNOSTI:

- poboljšani prijenos topline zbog viših koeficijenata prijelaza topline
- nema opasnosti od taloženja, zaprljanja i korodiranja cijevi
- primjenjivi na otopinama visoke viskoznosti podložnih kristalizaciji i taloženju
- prilagođeni radu u vakuumu
- omogućuju stvaranje proizvoda visoke koncentracije

NEDOSTACI:

- viša cijena
- dulje vrijeme zadržavanja otopine
- potreba za pumpom koja povećava operativne troškove i troškove održavanja

Opis poglavlja dan je prema literaturi [1].

U nastavku su ukratko opisani najosjetljiviji dijelovi uparne stanice prema literaturi [1].

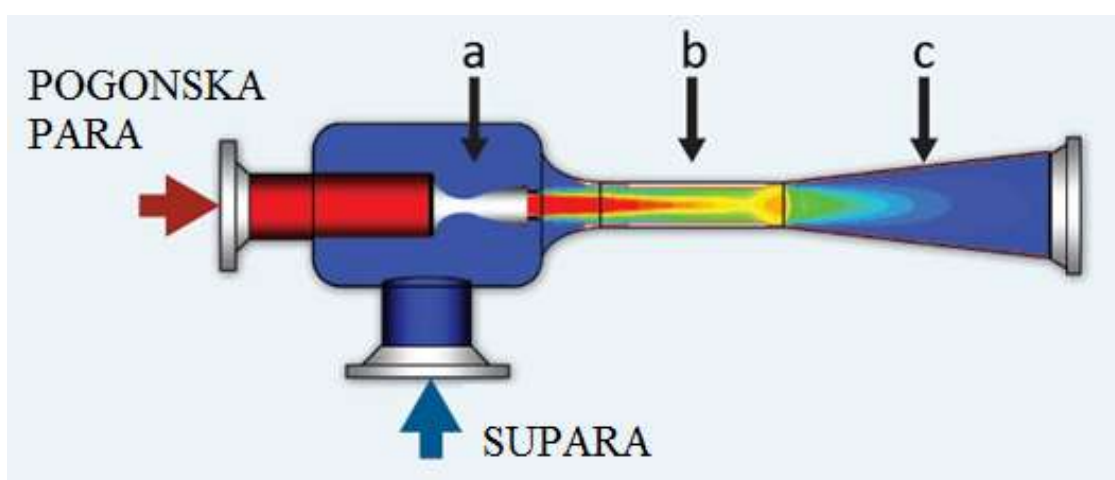
Cirkulacijska pumpa

Kod odabira pumpe bitno je uzeti u obzir maksimalnu dozvoljenu temperaturu otopine, tlak zasićenja, brzinu u cijevima, razliku u temperaturama između otopine koja ulazi u pumpu i otopine u cijevima. Otopina je blizu temperature isparavanja te je važno odrediti neto pozitivnu usisnu visinu za koju treba uzeti u obzir gustoću otopine, tlak zasićenja otopine, pad tlaka u cjevovodu, visinu isparivačkih cijevi, tlak u cijevima. Neto pozitivnom usisnom visinom i visinom dobave sprječava se pojava kavitacije odnosno osigurava se željena brzina u cijevima, prijenos topline i prijevremeno isparavanje otopine.

Termokompresor

U uparivačkoj jedinici termokompresor se koristi zbog jednostavnosti, niske cijene te kako bi se smanjili operativni troškovi i potrošnja energije. Dio supare se komprimira s visokotlačnom pogonskom parom te se tako pomiješana para koristi za daljnje zagrijavanje otopine.

Termokompresor ili mlazni ejektor sastoji se od tri osnovna dijela: a) De Lavalove mlaznice za pogonsku paru, b) komore za miješanje i c) difuzora kao što prikazuje [Slika 8.]



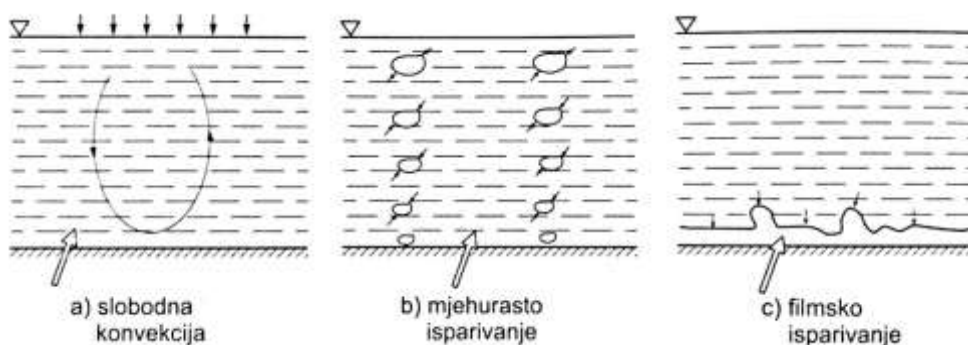
Slika 8. Termokompresor (mlazni ejektor)

Kompresija se odvija izmjenom količine gibanja između pogonske pare više entalpije i supare niže entalpije. Visokotlačna pogonska para se ubrzava do velike brzine u mlaznici gdje se potencijalna energija u obliku tlaka pretvara u kinetičku energiju u obliku brzine. Pogonska para zatim ulazi u komoru za miješanje u kojoj se miješa s usisanom suparom. Uslijed proširenja strujnog prostora u ulazu u difuzor, kinetička energija prelazi u potencijalnu. Strujni tok mješavine se usporava, brzina opada, a tlak raste sve do izlaska iz ejektora. Izlazni tlak ovisi o protoku i tlaku pogonske pare i supare te mu se vrijednost uvijek nalazi između ta dva tlaka.

3. OSNOVE ISPARIVANJA

Isparivanje je prijelaz vrele kapljevine u suhozasićenu paru zagrijavanjem pri stalnom tlaku. Prema tipu strujanja razlikujemo **isparivanje u mirujućoj kapljevini** (*pool boiling*) kod kojeg se toplina preko ogrjevne plohe prenosi na mirujuću kapljevinu i **isparivanje u struji kapljevine** (*flow boiling*) kod kojeg kapljevina ima brzinu u odnosu na ogrjevnu plohu. Prema intenzitetu toplinskog opterećenja ogrjevne plohe, a time i nametnutoj razlici temperatura na ogrjevnoj plohi, razlikujemo tri oblika isparivanja [Slika 9.]:

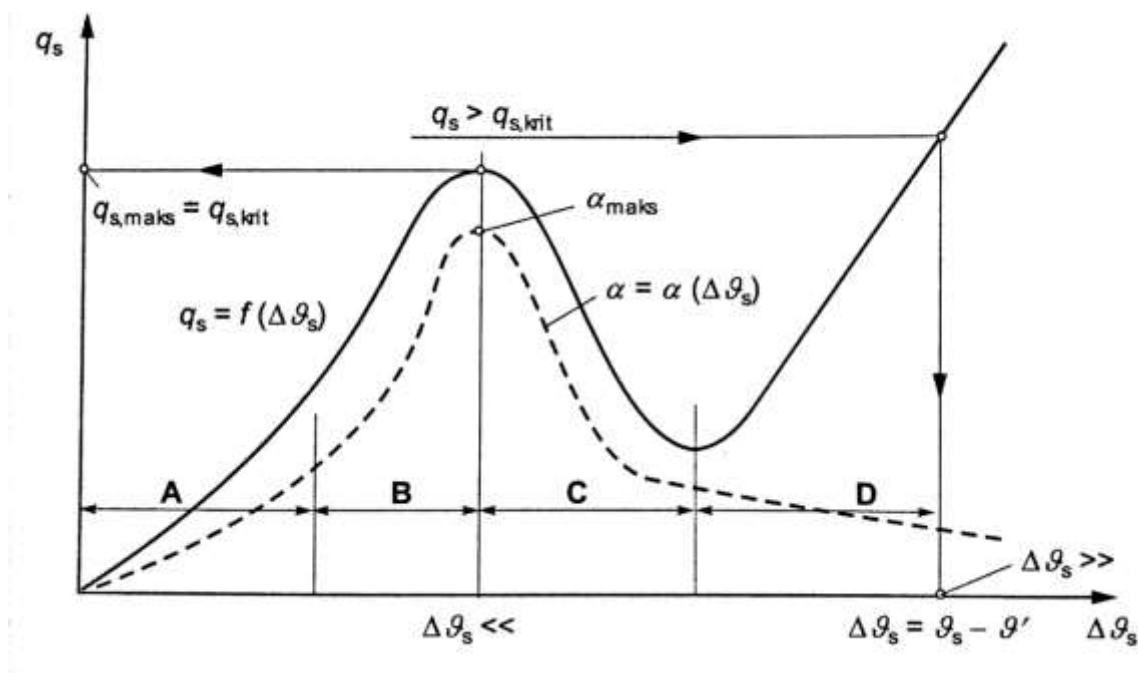
1. Isparivanje slobodnom konvekcijom – javlja se na slobodnoj površini između kapljevite i parovite faze pri malom toplinskom opterećenju ogrjevne plohe ($\Delta\vartheta_s \leq 5^\circ\text{C}$). Toplina se predaje od ogrjevne plohe kapljevini te se slobodnom konvekcijom transportira do slobodne površine kapljevine na kojoj se odvija isparivanje.
2. Mjehurasto isparivanje – kada je nametnuta temperaturna razlika na ogrjevnoj plohi $5 < \Delta\vartheta_s \approx 30^\circ\text{C}$ na određenim mjestima ogrjevne plohe se stvaraju parni mjehuri. Od kljajališta mjehur se otkida, raste i na koncu odvaja od slobodne površine. Postoji slučaj kada mjehuri nastanu na plohi i krenu prema gore, ali nestanu unutar kapljevine.
3. Filmsko isparivanje – zbog velikog toplinskog opterećenja ogrjevne plohe ($\Delta\vartheta_s \geq 120^\circ\text{C}$) stvara se tanki paroviti film između plohe i kapljevine koji se ponaša kao toplinski izolator te se postiže vrlo visoka temperatura plohe. Zbog toga se veći dio gustoće toplinskog toka prenosi zračenjem uz konvekciju i provođenje.



Slika 9. Oblici isparivanja [2]

3.1. Isparivanje u mirujućoj kapljevini (*Pool boiling*)

Prethodno navedeni oblici isparavanja mogu se kvalitativno prikazati u Nukiyaminom dijagramu kojeg prikazuje [Slika 10.]



Slika 10. Prikaz toplinskog opterećenja ogrjevnice plohe [2]

Na ordinati se nalazi gustoća toplinskog toka dok apscisa prikazuje razliku između temperature ogrjevnice plohe i temperature zasićenja kapljevine. U dijagramu je ucrtan i tijek koeficijenta prijelaza topline α koji odgovara tijeku gustoće toplinskog toka.

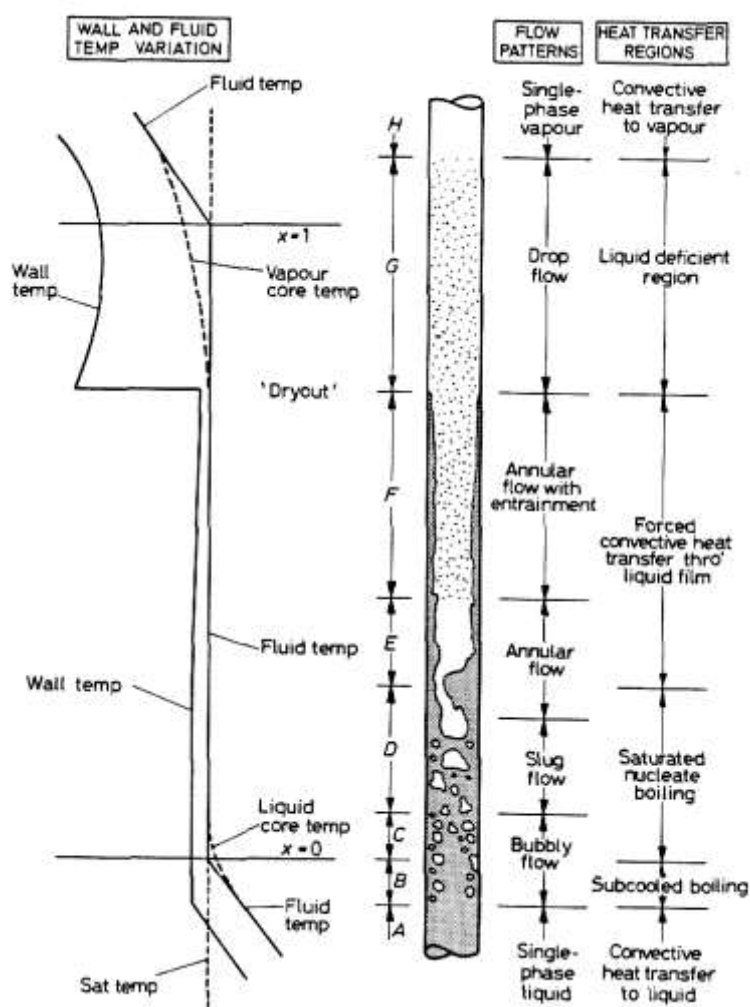
Područje **A** označuje isparivanje slobodnom konvekcijom. Nema stvaranja mjehurića i toplina se prenosi slobodnom konvekcijom. Povećanjem gustoće toplinskog toka, na hrapavosti ogrjevnice plohe počinju se stvarati mjehuri te započinje mjehurasto isparivanje označeno područjem **B**. Nagib krivulje počinje rasti. U početku se manji broj mjehura odvaja od klizališta, a na većim gustoćama toplinskog toka povećava se gustoća klizališta te učestalost odvajanja mjehura. Potpuno razvijeno mjehurasto isparivanje događa se kada se svi mjehuri počinju uzdizati vertikalno u odnosu na ogrjevnu plohu. Daljnjim povećanjem gustoće toplinskog toka nagib krivulje opada jer se stvaraju periodična suha područja na ogrjevnoj plohi zbog intenzivnog isparivanja na klizalištima koja se ponovno vlaže okolnom

kapljevino. Naposljetku, kapljevina ne stigne vlažiti suha područja na kojima se stvara paroviti film što dovodi do velikog povećanja temperature stjenke, a time i do opasnosti od progaranja ogrjevnice plohe. Gustoća toplinskog toka koja odgovara tom stanju naziva se *kritičnom* gustoćom toplinskog toka $q_{s,krit}$ i predstavlja gornju granicu razvijenog mjehurastog isparivanja koje je sigurno za opremu. Područje **C** označuje prijelazno isparivanje koje je nestabilno filmsko i nije ga moguće ostvariti s konstantnom gustoćom toplinskog toka. Područje **D** označava stabilno filmsko isparivanje. Površina plohe je u potpunosti prekrivena parovitim filmom i kapljevina nije u doticaju s površinom plohe.

Opis poglavlja prema literaturi [2].

3.2. Isparivanje u struji kapljevine (*Flow boiling*)

Isparivanje u struji kapljevine u grijanoj cijevi daje sličnu krivulju isparivanja kao kod slučaja isparivanja u mirujućoj kapljevini, ali su osnovni mehanizmi složeniji zbog smanjenja kapljevite faze i povećanja parne faze duž cijevi. Može se reći da je isparivanje u struji kapljevine ustvari superpozicija isparivanja u mirujućoj kapljevini i konvektivnog doprinosa zbog nametnutog, najčešće pumpom, gibanja kapljevine. [Slika 11.] prikazuje proces dinamičkog isparivanja kapljevine u vertikalnoj cijevi kružnog presjeka grijanoj jednolikim toplinskim tokom. U cijev ulazi pothlađena kapljevina i u potpunosti isparava duž cijevi. Područje **A** prikazuje zagrijavanje kapljevine do temperature zasićenja pri lokalnom tlaku. Na toj visini cijevi temperatura stjenke je još uvijek niska i ne dolazi do nastanka mjehura. Prijenos topline odvija se prema kapljevini konvekcijom, a može se odvijati pri laminarnom ili turbulentnom strujanju. Temperatura stjenke postepeno raste iznad temperature zasićenja i započinje stvaranje mjehura pri pothlađenom vrenju, koje je prikazano na području **B**, na pregrijanom temperaturnom graničnom sloju. Kapljevina se nalazi na temperaturi nižoj od temperature zasićenja, ali stjenka je dovoljno vruća za nastanak mjehura. Nastali mjehuri kondenziraju udaljavajući se od graničnog sloja i odlazeći u zonu pothlađene kapljevine. Povećanjem broja kljajališta počinje dominirati prijenos topline mjehurastim isparivanjem dok prijenos topline jednofaznom konvekcijom gubi na utjecaju. U područjima **C** i **D** granični sloj raste te se uspostavlja zasićeno mjehurasto isparivanje. U područjima **E** i **F** stvara se kapljeviti prstenasti film dovoljno debeo da zbog toplinske provodnosti stvori otpor i spriječi kapljevinu da se zagrije do temperature dovoljne



Slika 11. Isparavanje u struji kapljavine u jednoliko grijanoj vertikalnoj cijevi [4]

za održanje mjehurastog isparivanja. Toplina se prenosi sa stjenke kroz kapljeviti film prisilnom konvekcijom na područje s kapljevito-parnom fazom gdje se odvija isparivanje. Mjehurasto isparivanje iščezava, a zamjenjuje ga konvektivno isparivanje. Na početku područja **G** pri nekom kritičnom udjelu parne faze, kapljeviti film će potpuno ispariti. Taj prijelaz naziva se isušenje (eng. *dryout*) i popraćen je rastom temperature stjenke cijevi. Kroz to područje također raste i temperatura parne faze iznad temperature zasićenja, a prijenos topline se odvija preko četiri mehanizma: konvektivno prema parnoj fazi, prijenos topline na kapljice unutar parne faze, prijenos topline na kapljice koje se sudaraju sa stjenkom te zračenjem sa stjenke na kapljice. Zbog tog neravnotežnog efekta, kapljice postoje u parnoj fazi sve do područja **H** gdje sve kapljice ispare, a prijenos topline odvija se konvekcijom na čistu paru fazu. Opis poglavlja prema literaturi [4].

4. DVOFAZNI TOK

Međusobno djelovanje kapljevite i parne faze u isparivačkim cijevima dovoljno je kompleksno te se ne može opisati jednostavno kao jednofazno strujanje. Kod jednofaznog toka promjena gustoće prilikom zagrijavanja je umjerena dok se kod dvofaznog toka gustoće između kapljevine i pare razlikuju i do dva reda veličine. Zbog gravitacijske kao i tlačnih sila, faze ne teku istom brzinom što rezultira izmjenom količine gibanja između samih faza. Posljedica izmjena količine gibanja između faza je i dodatan pad tlaka u strujanju.

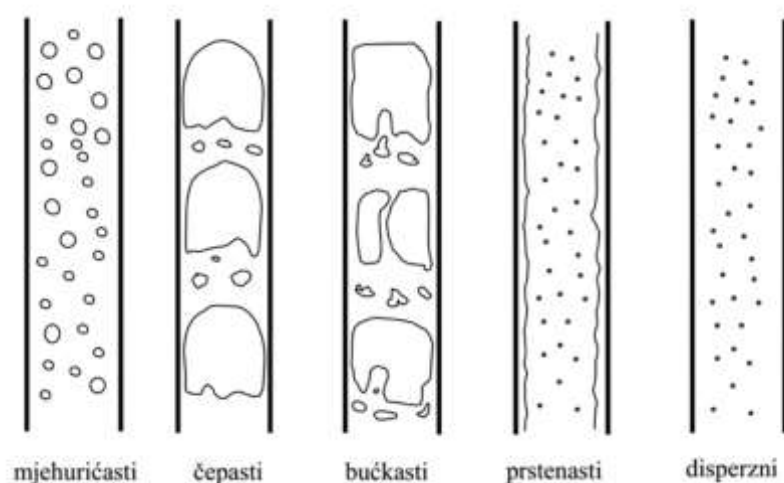
Kako bi se matematičkim alatom mogle opisati pojave u dvofaznom toku, nužno je primijeniti pojednostavljene fizikalne modele strujanja:

- Homogeni model - predstavlja najjednostavniji pristup analizi dvofaznog strujanja. Kreće se od pretpostavke da se dvofazni tok ponaša kao jednofazni čija se svojstva mogu izračunati interpolacijom svojstava kapljevite i parne faze. Posljedica ovakvog pristupa je uniformna brzina kapljevine i pare.
- Model odvojenih tokova - zasniva se na pretpostavci o odvojenim tokovima kapljevite i parne faze. Na taj se način mogu pisati jednačbe očuvanja mase, količine gibanja i energije odvojeno za svaku fazu. Ovaj pristup zahtjeva poznavanje interakcija između faza te poznavanje protočnog presjeka svake faze.
- Model temeljen na oblicima strujanja – zasniva se na definiranju nekoliko osnovnih režima strujanja i izgradnji dvofaznog modela na temelju pretpostavki prilagođenih svakom režimu strujanja. Osnovne jednačbe se rješavaju u granicama pojedinih oblika strujanja zbog čega je potrebno poznavati kriterije po kojima se oblici strujanja razlikuju jedan od drugoga.

4.1. Oblici strujanja

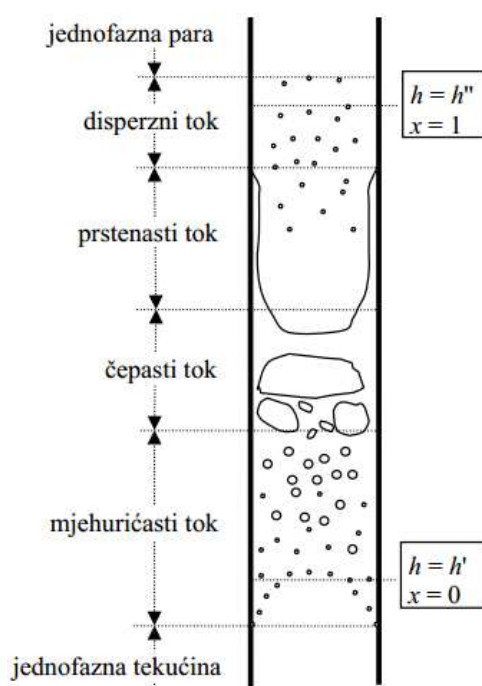
Dvofazni tok može poprimiti mnoge geometrijske konfiguracije u skladu s prostornim razmještajem kapljevite i parne faze u cijevi. Najčešće opisivani oblici strujanja u vertikalnim cijevima su:

- Mjehurićasti tok – parna je faza raspoređena u formi odijeljenih mjehurića unutar kontinuirane kapljevite faze. Veličina i oblik mjehurića može varirati, ali su približno sfernog oblika i manji od promjera cijevi.
- Čepasti tok – sudari i stapanje parnih mjehura rezultiraju rastom mjehura koji postižu veličinu promjera cijevi i ostvaruje se čepasti tok. Parni čepovi imaju oblik metka i okruženi su tankim filmom kapljevine. Između parnih čepova nalaze se čepovi kapljevine koji mogu sadržavati male parne mjehuriće.
- Bučkasti tok – nastaje razbijanjem pravilnih parnih čepova. Kapljevita faza održava neposredan kontakt sa stjenkom cijevi, a parna faza poprima kaotično kretanje. Tok je nestabilan i oscilirajućeg je karaktera.
- Prstenasti tok – kapljevita faza struji u obliku prstenastog toka uz stjenku cijevi dok u sredini cijevi struji parna faza. Na međufaznoj površini dolazi do formiranja valova uslijed interakcije parne struje s kapljevitim filmom koji dovode do otkidanja pojedinih dijelova kapljevitoz filma i predstavljaju izvor disperziranih kapljica nošenih kontinuiranom parnom fazom.
- Disperzni tok – predstavlja obrnuti slučaj mjehurićastog toka. Kapljevita je faza raspoređena u formi odijeljenih kapljica unutar kontinuirane parne faze. Disperzni tok i mjehurićasti tok se jedini mogu dobro opisati homogenim modelom dvofaznog strujanja.



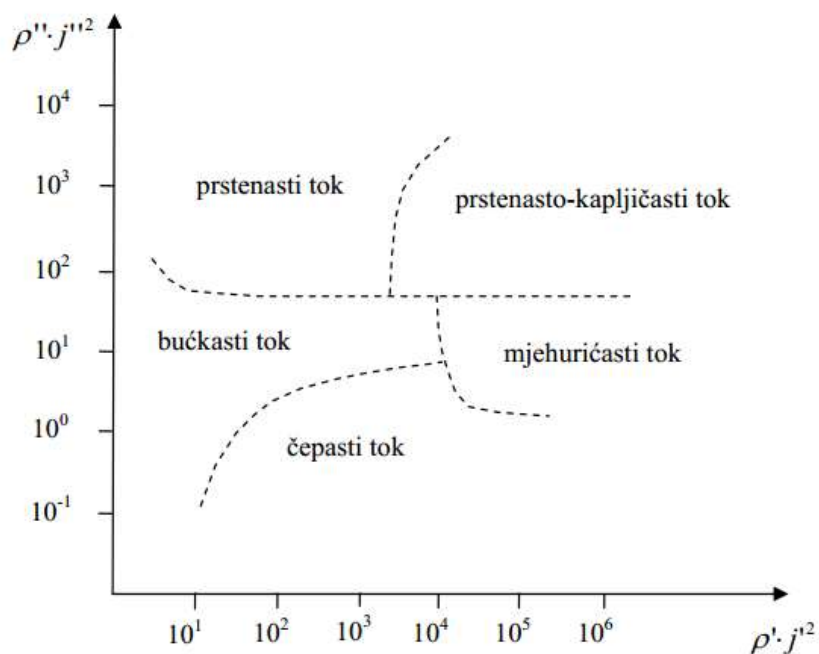
Slika 12. Režimi dvofaznog strujanja [5]

[Slika 13.] kao i [Slika 11.] prikazuju razvoj dvofaznog toka u vertikalnoj isparivačkoj cijevi koji je detaljnije opisan u poglavlju 3.2.



Slika 13. Razvoj dvofaznog toka u vertikalnoj isparivačkoj cijevi [5]

Režime dvofaznog strujanja moguće je razlikovati upotrebom dijagrama na [Slika 14.] koji prikazuje mapu dvofaznog toka dobivenu eksperimentalnim putem. Na apscisi se nalazi količina gibanja kapljevite faze, a na ordinati količina gibanja parne faze.



Slika 14. Mapa dvofaznog toka [5]

5. PRIJELAZ TOPLINE ISPARIVANJEM U STRUJI KAPLJEVINE

Od velike je važnosti točno predvidjeti koeficijent prijelaza topline kod isparivanja u struji kapljevine α_{tp} . Poznavanjem koeficijenta prijelaza topline i utjecaj parametara na njega mogu se smanjiti troškovi i izbjeći nepoželjni i skupi problemi u radu uslijed neispravne konstrukcije uparivača. Neke od glavnih složenosti u određivanju koeficijenta prijelaza topline u struji kapljevine su frekvencija i rast mjehura, raspodjela kljajališta, raspodjela kapljevite i parne faze u odnosu jedna na drugu te u odnosu na stjenku cijevi, zatim karakteristike izmjenjivačke površine. Cjelovit analitički model određivanja koeficijenta prijelaza topline kod isparivanja u struji kapljevine, koji uzima u obzir glavne navedene složenosti još nije razvijen za praktičnu upotrebu. Umjesto toga brojni empirijski modeli dostupni su u literaturi koji daju eksperimentalne vrijednosti koeficijenta prijelaza topline za slučaj isparivanja u struji kapljevine.

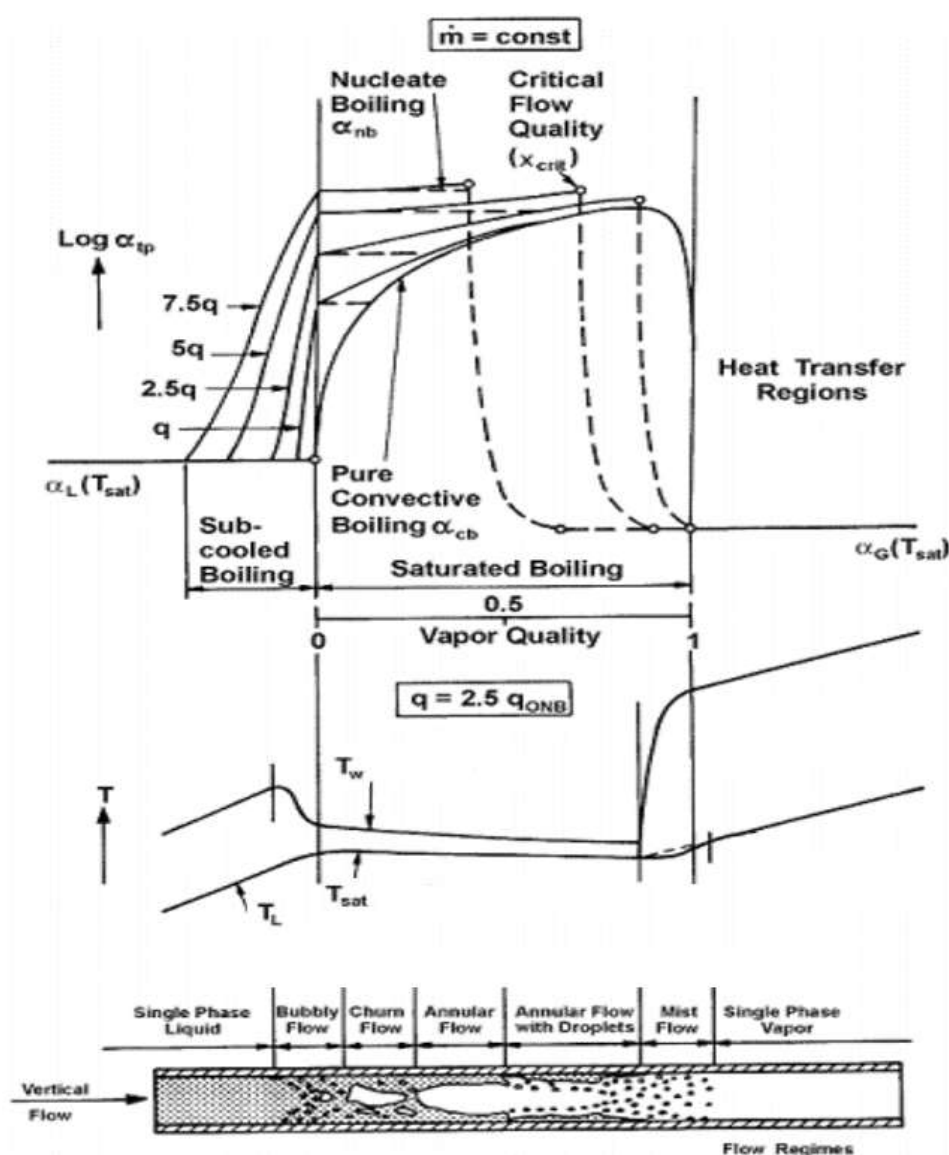
Većina modela uzima u obzir dva mehanizma prijenosa topline: mjehurasto isparivanje i konvektivno isparivanje. Oni imaju najveći utjecaj u određivanju koeficijenta prijelaza topline kod isparivanja u struji kapljevine u vertikalnim cijevima. Mjehurasto isparivanje karakterizirano je nastajanjem parnih mjehura na grijanoj stjenki, a konvektivno isparivanje karakterizirano je kondukcijom i konvekcijom između grijane stjenke i kapljevitoz filma.

Kada isparivanjem u struji kapljevine u vertikalnim cijevima dominira mjehurasto isparivanje, koeficijent prijelaza topline α_{nb} povećava se s povećanjem gustoće toplinskog toka i tlaka zasićenja ($\alpha_{nb} \propto q^{0.7}$). S druge strane, kada je dominantno konvektivno isparivanje, koeficijent prijelaza topline α_{cb} je puno manje ovisan o gustoći toplinskog toka te raste povećanjem masenog protoka, sadržaja pare. Mjehurasto isparivanje dominantno je kod nižih vrijednosti sadržaja pare te viših vrijednosti gustoće toplinskog toka dok je konvektivno isparivanje dominantno kod viših vrijednosti sadržaja pare te nižih vrijednosti gustoće toplinskog toka.

U tehničkoj primjeni se vrlo često koristi izraz koji povezuje mjehurasto i konvektivno isparivanje te daje vrijednost lokalnog koeficijenta prijelaza topline u struji kapljevine u ovisnosti o lokalnoj visini z , a dan je jednadžbom (1).

$$\alpha(z)_{tp} = [(\alpha(z)_{nb})^n + (\alpha(z)_{cb})^n]^{1/n} \quad (1)$$

Kada je vrijednost potencije $n = 1$, rezultat je jednostavno zbroj dvaju koeficijenata. Chen model i Gungor-Winterton model koriste ovaj pristup uz odgovarajuće korekcijske faktore kod izračuna koeficijenata prijelaza topline. Model iz VDI Heat Atlas-a koristi $n = 3$, dok Shah model koristi $n = \infty$ koji daje veću vrijednost između dva koeficijenta.



Slika 15. Proces isparavanja u vertikalnoj cijevi prema Steiner-Taborek modelu [4]

5.1. Gungor-Winterton model

Lokalni koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha(z)_{tp} = E\alpha_L + S\alpha_{nb} \quad (1)$$

Mjehurasti koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_{nb} = 55p_r^{0.12}(-0.4343 \ln p_r)^{-0.55}M^{-0.5}q^{0.67} \quad (2)$$

Konvektivni koeficijent prijelaza topline:

$$\begin{cases} \alpha_L = 0.023Re_L^{0.8}Pr_L^{0.4}\left(\frac{\lambda_L}{d_i}\right) \\ Re_L = \frac{\dot{m}(1-x)d_i}{\mu_L} \end{cases} \quad (3)$$

Dvofazni konvektivni faktor:

$$\begin{cases} E = 1 + 24000Bo^{1.16} + 1.37\left(\frac{1}{X}\right)^{0.86} \\ Bo = \frac{q}{\dot{m}r} \\ X = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.9}\left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0.5}\left(\frac{\mu_L}{\mu_G}\right)^{0.1} \end{cases} \quad (4)$$

Supresijski faktor isparavanja:

$$S = (1 + 0.00000115E^2Re_L^{1.17})^{-1} \quad (5)$$

Gdje su:

M – molekularna masa

p_r – reducirani tlak

Bo – *Boiling number* – utjecaj gustoće toplinskog toka na mjehurasto isparavanje

ρ_L – gustoća kapljevite faze

ρ_V – gustoća parne faze

x – sadržaj pare

X – Martinelli parametar

r – specifična toplota isparavanja

5.2. Model iz VDI Heat Atlas-a

Lokalni koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha(z)_{tp} = [(\alpha(z)_{nb})^3 + (\alpha(z)_{cb})^3]^{1/3} \quad (1)$$

Koeficijenti prijelaza topline za konvektivno $\alpha(z)_{cb}$ i mjehurasto $\alpha(z)_{nb}$ isparavanje:

$$\frac{\alpha(z)_{cb}}{\alpha_{LO}} = \left\{ (1-x)^{0.01} \cdot \left[(1-x)^{1.5} + 1,9x^{0.6} \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^{0.35} \right]^{-2.2} + x^{0.01} \cdot \left[\frac{\alpha_{GO}}{\alpha_{LO}} \cdot \left(1 + 8(1-x)^{0.7} \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^{0.67} \right) \right]^{-2} \right\}^{-0.5} \quad (2)$$

$$\frac{\alpha(z)_{nb}}{\alpha_0} = C_F \left(\frac{q}{q_0} \right)^{n(p^*)} \cdot \left[2,816p^{*0.45} + \left(3,4 + \frac{1,7}{1-p^{*7}} \right) p^{*3.7} \right] \cdot \left(\frac{d_0}{d} \right)^{0.4} \left(\frac{R_a}{R_{a0}} \right)^{0.133} \quad (3)$$

gdje su:

α_{LO} – lokalni koeficijent prijelaza topline za kapljevinu

α_{GO} – lokalni koeficijent prijelaza topline za paru

ρ' – gustoća kapljevite faze

ρ'' – gustoća parne faze

x – sadržaj pare

q – gustoća toplinskog toka

C_F – faktor molekularne mase

d – unutarnji promjer cijevi

R_a – srednja visina hrapavost

p^* – reducirani tlak

n – eksponent reduciranog tlaka

α_0 – normalizirana vrijednost koeficijenta prijelaza topline

q_0 – normalizirana gustoća toplinskog toka

d_0 – normalizirani unutarnji promjer cijevi

R_{a0} – normalizirana srednja visina hrapavost

5.3. Shah model

Shah model koristi $n = \infty$ koji daje veću vrijednost između dva koeficijenta prijelaza topline.

Lokalni koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha(z)_{tp} = [(\alpha(z)_{nb})^\infty + (\alpha(z)_{cb})^\infty]^{1/\infty} \quad (1)$$

Koeficijent prijelaza topline za konvektivno isparivanje:

$$\frac{\alpha(z)_{cb}}{\alpha_L} = \frac{1.8}{C_0^{0.8}} \quad (2)$$

$$\begin{cases} C_0 = \left(\frac{x}{1-x}\right)^{0.8} \left(\frac{\rho_L}{\rho_V}\right)^{0.5} \\ \alpha_L = 0.023 Re_L^{0.8} Pr_L^{0.4} \left(\frac{\lambda_L}{d_i}\right) \\ Re_L = \frac{\dot{m}(1-x)d_i}{\mu_L} \end{cases} \quad (3)$$

Koeficijent prijelaza topline za mjehurasto isparivanje:

$$Bo = \frac{q}{\dot{m}r} \quad (4)$$

$$\begin{cases} C_0 > 1 \text{ i } Bo > 0.0003 \\ \frac{\alpha(z)_{nb}}{\alpha_L} = 230 Bo^{0.5} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} C_0 > 1 \text{ i } Bo < 0.0003 \\ \frac{\alpha(z)_{nb}}{\alpha_L} = 1 + 46 Bo^{0.5} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} 1 > C_0 > 0.1 \\ \frac{\alpha(z)_{nb}}{\alpha_L} = F_s Bo^{0.5} \exp(2.74 C_0 - 0.1) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} C_0 < 0.1 \\ \frac{\alpha(z)_{nb}}{\alpha_L} = F_s Bo^{0.5} \exp(2.74 C_0 - 0.15) \end{cases} \quad (8)$$

$$F_s = 14.7 \text{ za } Bo > 0.0011$$

$$F_s = 15.43 \text{ za } Bo < 0.0011$$

Gdje su:

C_0 – bezdimenzijski broj

F_s – Shahova konstanta

Bo – *Boiling number* – utjecaj gustoće toplinskog toka na mjehurasto isparivanje

ρ_L – gustoća kapljevite faze

ρ_V – gustoća parne faze

x – sadržaj pare

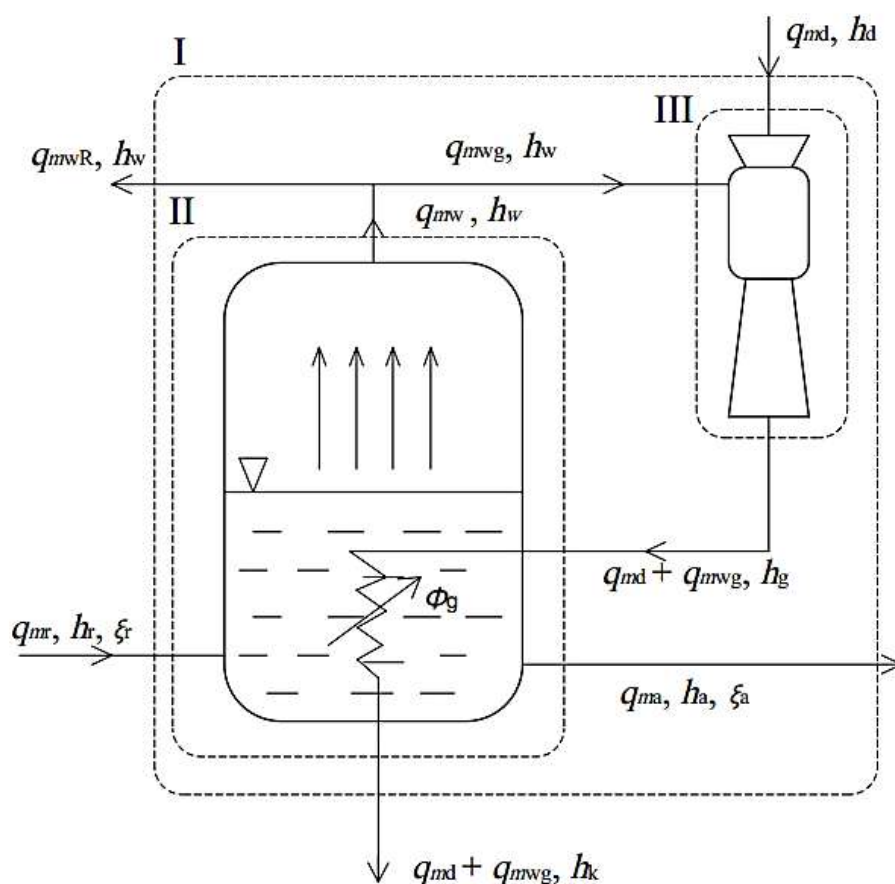
r – specifična toplina isparavanja

\dot{m} – masena brzina

6. TERMODINAMIČKI PRORAČUN

Model zadane uparivačke stanice za uparivanje u jednom stupnju s termokompresijom supare, temelji se na bilancama mase i energije.

Svježi sok od rajčice koncentracije ξ_r i entalpije h_r ulazi u uparivačku stanicu s masom q_{mr} . Zagrijavanjem soka ogrjevnom parom entalpije h_g nastaje supara mase q_{mw} i entalpije h_w te koncentrat soka rajčice mase q_{ma} , koncentracije ξ_a te entalpije h_a . Jedan dio supare mase q_{mwR} se kondenzira, a drugi dio mase q_{mwg} se miješa s pogonskom parom mase q_{md} i entalpije h_d u ejektoru za dobivanje ogrjevne pare. Ogrjevna para kondenzira predajući toplinu soku od rajčice te nastaje kondenzat entalpije h_k .



Slika 16. Shematski prikaz uparne stanice

U početku je odabrano je da će isparivanje biti u jednom metru cijevi, pri temperaturi isparivanja 60°C i temperaturnoj razlici $\Delta\vartheta_{\text{gr}} = 10^{\circ}\text{C}$. Zbog mješavine kapljevine i pare, odnosno promjene gustoće po visini, dolazi do porasta hidrostatskog tlaka u odnosu na $p(60^{\circ}\text{C})=0,2 \text{ bar}$. Uzimajući srednju gustoću od 400 kg/m^3 računa se porast tlaka kao:

$$\Delta p = \rho_{\text{sr}} \cdot g \cdot \Delta h = 400 \cdot 9,81 \cdot 1 \approx 0,04 \text{ bar}$$

što mijenja temperaturu u isparivačkoj cijevi za 4 stupnja.

Potom je uzeta srednja temperatura isparivanja između početka i kraja cijevi koja iznosi $\vartheta_{\text{zas}} = (64 + 60)/2 = 62^{\circ}\text{C}$. Da bi temperaturna razlika na isparivačkim cijevima bila 10°C , ejektor je konstruiran na način da daje ogrjevnu paru temperature 72°C .

6.1. Bilanca mase sustava

Bilanca mase sustava koji se sastoji od uparivača i termokompresora izvedena je u odnosu na bilancni krug I označen na [Slici 16.].

Zadani podaci:

$$q_{\text{mw}} = 500 \text{ kg/h}$$

$$\xi_{\text{r}} = 5\%$$

$$\xi_{\text{a}} = 30\%$$

$$\vartheta_{\text{zas}} = \vartheta_{\text{a}} = 62^{\circ}\text{C}$$

$$h_{\text{d}}(6 \text{ bar}) = 2756 \text{ kJ/kg}$$

Temperaturna depresija:

Često se, prema literaturi [9], temperaturna depresija pri uparivanju rajčice, pogotovo pri niskim koncentracijama, može zanemariti. Iz iskustvenih je razloga, za ovaj slučaj uparivanja, odabran iznos temperaturne depresije koji odgovara šećernim otopinama:

$$\Delta\vartheta_{\text{dep}} = 0.33 \cdot e^{4 \cdot \xi_{\text{a}}} = 0.33 \cdot e^{4 \cdot 0,3} = 1,1^{\circ}\text{C}$$

Ukupna tvar:

$$q_{\text{mr}} + q_{\text{md}} = q_{\text{mwr}} + q_{\text{mwg}} + q_{\text{md}} + q_{\text{ma}} \quad (1)$$

$$q_{\text{mw}} = q_{\text{mwr}} + q_{\text{mwg}} = q_{\text{mr}} - q_{\text{ma}} = 500 \text{ kg/h}$$

Količina svježe otopine:

$$q_{mr} = \frac{q_{mw}}{1 - \frac{\xi_r}{\xi_a}} = \frac{500}{1 - \frac{0,05}{0,3}} = 600 \text{ kg/h} \quad (2)$$

$$q_{mr}\xi_r = q_{ma}\xi_a \quad (3)$$

Količina ugušćene otopine iz (3):

$$q_{ma} = q_{mr} \frac{\xi_r}{\xi_a} = 600 \frac{0,05}{0,3} = 100 \text{ kg/h}$$

Utrošak pare:

$$\phi_{gr} = (q_{md} + q_{mwg})(h_g - h_k) / : q_{md} \quad (4)$$

$$\phi_{gr} = q_{md} \left(1 + \frac{q_{mwg}}{q_{md}} \right) (h_g - h_k)$$

$$S = \frac{q_{mwg}}{q_{md}} \quad (5)$$

Uvrštavanjem (5) u (4) dobije se:

$$\phi_{gr} = q_{md}(1 + S)(h_g - h_k) \quad (6)$$

Količina svježe pare tlaka 6 bar za zagrijavanje svježe i recirkulirane mase dobije se iz (6) te iznosi:

$$q_{md} = \frac{\phi_{gr}}{(1 + S)(h_g - h_k)} = \frac{347}{(1 + 1)(2684 - 293,09)} = 0,0727 \text{ kg/s} = 261,8 \text{ kg/h}$$

Gdje se h_g dobije iz bilance energije termokompresora u poglavlju 6.3. kao:

$$h_g = \frac{Sh_w + h_d}{(S + 1)} = \frac{1 \cdot 2611 + 2756}{2} = 2684 \text{ kJ/kg}$$

6.2. Bilanca energije uparivača

Bilanca energije uparivača izvedena je u odnosu na bilancni krug II označen na [Slici 16.].

$$q_{mr}h_r + (q_{md} + q_{mwg})h_g = q_{mw}h_w + (q_{md} + q_{mwg})h_k + q_{ma}h_a \quad (1)$$

$$\phi_{gr} = (q_{md} + q_{mwg})(h_g - h_k) = q_{mw}h_w + q_{ma}h_a - q_{mr}h_r \quad (2)$$

Izmijenjeni toplinski tok prema (2):

$$\phi_{gr} = \frac{500}{3600} \cdot 2611 + \frac{100}{3600} \cdot 228,16 - \frac{600}{3600} \cdot 123,08 = 347 \text{ kW}$$

Specifični toplinski kapacitet računa se prema aditivnoj formuli:

$$c = \xi \cdot c_{st} + (1 - \xi) \cdot c_w$$

$$c_{st}(25^\circ\text{C}) = 3,5 \text{ kJ}/(\text{kgK}) \quad \text{prema literaturi [11]}$$

$$c_w(25^\circ\text{C}) = 4,187 \text{ kJ}/(\text{kgK})$$

$$c_r = \xi_r \cdot c_{st} + (1 - \xi_r) \cdot c_w = 0,05 \cdot 3,5 + (1 - 0,05) \cdot 4,187 = 4,1 \text{ kJ}/(\text{kgK})$$

$$c_a = \xi_a \cdot c_{st} + (1 - \xi_a) \cdot c_w = 0,3 \cdot 3,5 + (1 - 0,3) \cdot 4,187 = 3,68 \text{ kJ}/(\text{kgK})$$

Entalpije:

$$h_r = \vartheta_r \cdot c_r = 30 \cdot 4,1 = 123,08 \text{ kJ/kg}$$

$$h_a = \vartheta_a \cdot c_a = 62 \cdot 3,68 = 228,16 \text{ kJ/kg}$$

$$h_w(61,1^\circ\text{C}, 0,2 \text{ bar}) = 2611 \text{ kJ/kg}$$

$$h_k = h_{zas}(72^\circ\text{C}) = 293,09 \text{ kJ/kg}$$

$$h_d = h_{zas}(6 \text{ bar}) = 2756 \text{ kJ/kg}$$

6.3. Bilanca energije termokompresora (mlazni ejektor)

Bilanca energije termokompresora izvedena je u odnosu na bilancni krug III označen na [Slici 16.]. Ejektor je konstruiran sa stupnjem upijanja $S = 1$.

$$q_{m_{wg}}h_w + q_{m_d}h_d = (q_{m_{wg}} + q_{m_d})h_g \quad / : q_{m_d} \quad (1)$$

$$Sh_w + h_d = (S + 1)h_g \quad (2)$$

Iz (2) slijedi:

$$h_g = \frac{Sh_w + h_d}{(S + 1)} = \frac{1 \cdot 2611 + 2756}{2} = 2684 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{m_{wg}} = Sq_{m_d} = 1 \cdot 261,8 = 261,8 \text{ kg/h}$$

$$q_{m_{wR}} = q_{m_w} - q_{m_{wg}} = 500 - 261,8 = 0,0661 \text{ kg/s} = 238,2 \text{ kg/h}$$

Dobivene su količina supare $q_{m_{wg}}$ koja se u ejektoru miješa sa svježom parom te preostali dio neiskorištene supare koja se kondenzira u kondenzatoru $q_{m_{wR}}$.

6.4. Termodinamički proračun uparivača

Tijek proračuna je iterativan. Odabire se broj i promjer cijevi s kojima se računa promjer cijevne stijenke D_v , koeficijent prolaza topline te površina izmjene topline. Iz dobivene površine izmjene topline računa se duljina plašta L koja s promjerom cijevne stijenke mora zadovoljiti uvjet $L/D_v = 3 \div 7$. U suprotnom odabire se drugi broj ili promjer cijevi. Za proračun koeficijenta prolaza topline potrebno je izračunati koeficijent prijelaza topline na vanjskoj i unutarnjoj strani prema navedenim izrazima.

6.4.1. Svojstva sudionika

PRIMAR – ogrjevna para u plaštu

Temperatura zasićenja ogrjevnice pare: $\vartheta_1 = 72^\circ\text{C}$

Srednja temperatura kondenzata [2]:

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_s + \vartheta_1}{2} = \frac{70,54 + 72}{2} = 71,3^\circ\text{C}$$

Svojstva kondenzata za $71,3^\circ\text{C}$:

ρ_1	977,71 kg/m ³
$r(70^\circ\text{C})$	2333080 J/kg
λ_1	0,66311 W/mK
μ_1	0,00040388 Pa · s

SEKUNDAR – otopina rajčice u cijevima

Srednja temperatura u uparivaču iznosi $\vartheta_2 = 62^\circ\text{C}$

Svojstva otopine za $\vartheta_2 = 62^\circ\text{C}$:

ρ'_2	983,19 kg/m ³
c'_{p2}	4,1829 kJ/(kgK)
λ'_2	0,65436 W/(mK)
μ'_2	0,00046638 Pa · s
Pr'_2	2,9813
ρ''_2	0,13041 kg/m ³
c''_{p2}	1,9664 kJ/(kgK)
λ''_2	0,02119 W/(mK)
μ''_2	0,00001093 Pa · s
Pr''_2	1,0143

6.4.2. Odabir promjera i broja cijevi

Odabrano za sekundar:

Čelična bešavna cijev W.Nr. 1.4301

Ø 34 x 1 mm

$n = 127$

6.4.3. Promjer cijevne stjenke

Geometrijski faktor za trokutasti raspored $f_1 = 1,1$

Faktor za broj prolaza $f_2 = 0$ (za 1 prolaza)

Razmak cijevi kod trokutastog rasporeda: $t = 1,25d_v = 42,5$ mm

Ukupan broj cijevi: $z = 127$

Promjer plašta:

$$OTL = \sqrt{f_1 \cdot t^2 \cdot z + f_2 \cdot \sqrt{z} \cdot t} + d_v$$

$$OTL = \sqrt{1,1 \cdot 42,5^2 \cdot 127 + 0 \cdot \sqrt{127} \cdot 42,5} + 34 = 536,3 \text{ mm}$$

Kriterij za odabir plašta izmjenjivača: $D_u > OTL$

Izabrana čelična šavna cijev Ø 600 x 4 mm

Tablice iz kojih su uzeti faktori kao i računanje OTL nalaze se u VDI Heat Atlasu [7].

6.4.4. Koeficijent prijelaza topline na strani otopine

Odabir modela prijelaza topline:

Uspoređena su tri modela prijelaza topline: Gungor-Winterton, Shah, model iz VDI Heat Atlas-a. Rezultati proračuna su pokazali da srednji koeficijenti prolaza topline k_{sr} iznose:

$$k_{sr} = 1448 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \text{za model iz VDI Heat Atlas-a [7]}$$

$$k_{sr} = 1241 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \text{za model Gungor-Winterton [4]}$$

$$k_{sr} = 723 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \text{za model Shah [4]}$$

Shah model ne uzima u obzir utjecaj oba koeficijenta prijelaza topline, za konvektivno i mjehurasto isparivanje nego daje veću vrijednost između njih te stoga nije odabran. Kod modela iz VDI Heat Atlasa u jednadžbi za izračun koeficijenta prijelaza topline za mjehurasto isparivanje, reducirani tlak je izvan raspona valjanosti jednadžbe pa iz tog razloga nije odabran. Model Gungor-Winterton uzima u obzir i koeficijent prijelaza topline za konvektivno i mjehurasto isparivanje, daje vrijednosti koje su najbliže vrijednostima korištenim u praksi te je iz tog razloga korišten u ovom radu.

Ulazni podaci:

n_c	127
d_u	0,032 m
L	3 m
q_{mr}	600 kg/h
q_{mw}	500 kg/h
q_{mST}	30 kg/h
Φ	347 kW
q	9,06 kW/m ²

gdje su:

$$q_{mST} = q_{mr} \cdot \xi_r = 600 \cdot 0,05 = 30 \text{ kg/h}$$

$$q = \frac{\Phi}{\pi \cdot d_u \cdot L \cdot n_c} = \frac{347}{\pi \cdot 0,032 \cdot 3 \cdot 127} = 9,06 \text{ kW/m}^2$$

Uparivač je podijeljen na dvanaest dijelova L_i prema koncentraciji (masenom udjelu) suhe tvari ξ te su koeficijenti prijelaza topline α_{Li} računati za prosječne vrijednosti masenog udjela suhe tvari unutar dijelova prema navedenim modelima. Tako izračunati koeficijenti prijelaza topline su potom osrednjeni prema relaciji:

$$\alpha_{u,sr} = \frac{\sum_{i=1}^{12} \alpha_{Li} \cdot L_i}{L} \quad (1)$$

Tablica 2. Rezultati proračuna koeficijenta prijelaza topline na strani otopine

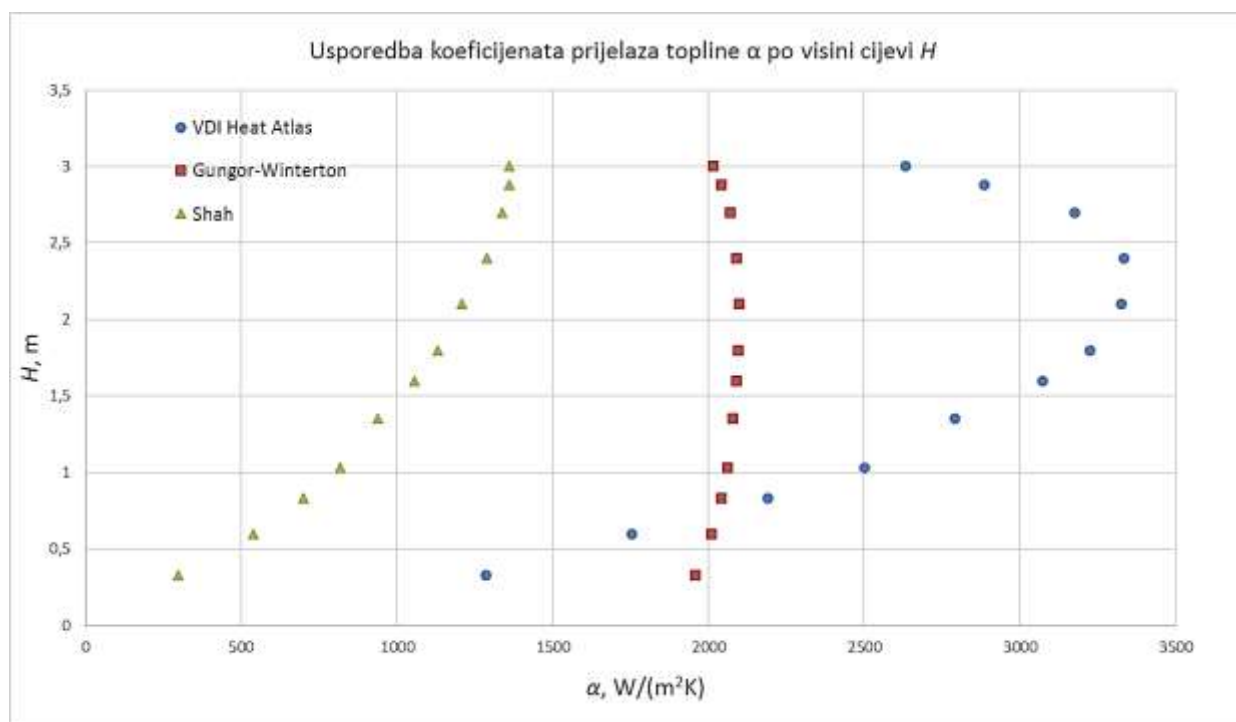
Dio	ξ_{sr} %	x_{sr} kg/kg	Δq_{mw} kg/h	Φ_L kW	L_i m	VDI α_{Li} W/(m ² K)	G-W α_{Li} W/(m ² K)	Shah α_{Li} W/(m ² K)
1	5,25	0,05	54,72	37,85	0,33	1286,1	1955,1	296,1
2	5,75	0,13	45,36	31,55	0,27	1753,9	2008,9	538,1
3	6,25	0,20	38,52	26,69	0,23	2189,4	2039,7	699,5
4	6,75	0,26	33,12	22,88	0,20	2500,2	2059,7	817,1
5	7,5	0,33	53,64	37,18	0,32	2792,5	2077,8	936,8
6	8,5	0,41	41,76	28,92	0,25	3071,4	2091	1054,8
7	9,5	0,47	33,48	23,13	0,20	3223,7	2096,6	1131,5
8	11	0,54	50,04	34,70	0,30	3325,9	2097,5	1208,9
9	13,5	0,63	50,04	34,70	0,30	3333,6	2090,2	1288,5
10	17,5	0,71	50,04	34,70	0,30	3176,7	2071	1337,8
11	22,5	0,78	29,88	20,82	0,18	2884,7	2043,5	1359,4
12	27,5	0,82	20,16	13,88	0,12	2632,6	2018,1	1359,2
UKUPNO			500	347	3			

Osrednjene vrijednosti prema relaciji (1):

$$\alpha_{u, sr} = 2643,3 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \text{za model iz VDI Heat Atlas-a}$$

$$\alpha_{u, sr} = 2054,5 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \text{za Gungor-Winterton model}$$

$$\alpha_{u, sr} = 972 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \text{za Shah model}$$



Slika 17. Usporedba koeficijenata prijelaza topline po visini cijevi

6.4.5. Koeficijent prijelaza topline na strani ogrjevnice pare

Temperatura stijenke ϑ_s je nepoznata pa se proračun vrši iterativno pretpostavljajući temperaturu stijenke da se poklope stacionarni toplinski tokovi na određenom mjestu.

Korišten izraz prema Nusseltu [2]:

$$\alpha_v = \frac{4}{3} \sqrt[4]{\frac{g \cdot \rho_1^2 \cdot \lambda_1^3 \cdot r}{4 \cdot \eta_1 \cdot (\vartheta - \vartheta_s) \cdot H}} = \frac{4}{3} \sqrt[4]{\frac{9.81 \cdot 977.71^2 \cdot 0.64923^3 \cdot 2333080}{4 \cdot 0.00040388 \cdot (72 - 70.54) \cdot 3}} = 7750 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Zbog utjecaja nekondenzirajućih plinova koeficijent prijelaza topline α_v iz iskustvenih se razloga smanjuje za 40%.

$$\alpha_v = 4650 \text{ W/m}^2\text{K}$$

6.4.6. Koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu cijevi

Korišten izraz [2]:

$$k_{sr} = \frac{1}{\frac{d_v}{d_u \cdot \alpha_{usr}} + \frac{r_v}{\lambda_c} \ln \frac{d_v}{d_u} + \frac{1}{\alpha_v}} = \frac{1}{\frac{0.034}{0.032 \cdot 2054.5} + \frac{0.017}{14} \ln \frac{0.034}{0.032} + \frac{1}{4650}} =$$

$$= 1241 \text{ W/m}^2\text{K}$$

6.4.7. Površina izmjene topline

Površina za izmjenu topline:

$$A = \frac{\Phi}{k_{sr} \cdot \Delta \vartheta_{gr}} = \frac{347000}{1241 \cdot 10} = 27,96 \text{ m}^2$$

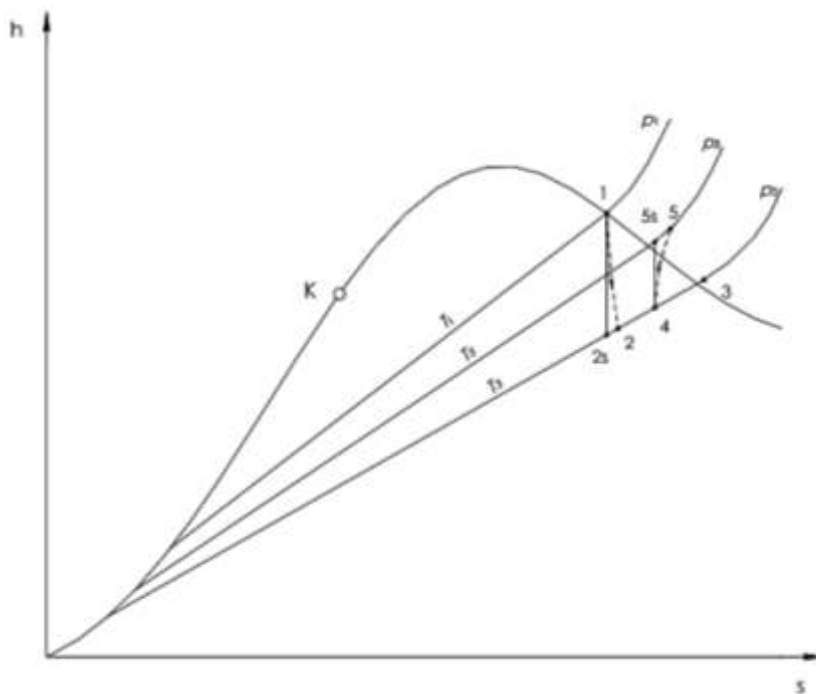
Duljina plašta:

$$L = \frac{A}{d_v \cdot \pi \cdot n_c} = \frac{27,96}{0,034 \cdot \pi \cdot 127} = 2,06 \text{ m}$$

$$\frac{L}{D_v} = \frac{2,06}{0,6} = 3,43$$

Uvjet L/D_v od 3 do 7 , zadovoljen.

6.5. Termodinamički proračun ejektora



Slika 18. Prikaz procesa u h,s dijagramu

Ulazni podaci:

$$p_1(\vartheta_{zas} = 158,83^{\circ}\text{C}) = 6 \text{ bar}$$

$$p_3(\vartheta_{zas} = 60,6^{\circ}\text{C}) = 0,2 \text{ bar}$$

$$p_5(\vartheta_{zas} = 72^{\circ}\text{C}) = 0,34 \text{ bar}$$

S	1 – pretpostavljeni stupanj upijanja
φ_1	0,94 – faktor brzine
$\varphi_2\varphi_3$	0,9 – faktori sudaranja i trenja
φ_4	0,94 – faktor trenja u difuzoru

Proračun je iterativan. Prvo se pretpostavlja stupanj upijanja, zatim se pomoću ulaznih parametara određuje stanje 4 pomoću kojeg se dobije izentropska razlika entalpija

$\Delta h_{4s} = h_{5s} - h_4$ s kojom se računa stupanj upijanja prema danoj jednadžbi dok se ne poklopi s pretpostavljenim stupnjem upijanja.

Korišteni izrazi izvedeni su iz prvog glavnog stavka, zakona o održanju energije te zakona o održanju količine gibanja.

DeLavalova mlaznica

$$h_1(\vartheta_1, p_1) = 2756130 \text{ J/kg}$$

$$h_{2s}(p_3, s_1) = 2225960 \text{ J/kg}$$

Teorijska brzina na izlasku iz mlaznice:

$$w_{2s} = \sqrt{2(h_1 - h_{2s})} = 1030 \text{ m/s}$$

Stvarna brzina na izlasku iz mlaznice:

$$w_2 = \varphi_1 w_{2s} = 968 \text{ m/s}$$

Stupanj djelovanja DeLavalove mlaznice:

$$\eta_L = \varphi_1^2 = 0,88$$

Komora miješanja

$$h_3(\vartheta_3, p_3) = 2616680 \text{ J/kg}$$

Teorijska brzina mješavine na ulazu u difuzor:

$$w_{4s} = \frac{w_2}{1 + S} = 484 \text{ m/s}$$

Stvarna brzina na ulazu u difuzor:

$$w_4 = \varphi_2 \varphi_3 w_{4s} = 436 \text{ m/s}$$

Entalpija smjese pogonske pare i supare na kraju komore miješanja:

$$h_4 = \frac{h_1 + S h_3}{1 + S} - \left(\frac{\varphi_1 \varphi_2 \varphi_3}{1 + S} \right)^2 \cdot (h_1 - h_{2s}) = 2597631 \text{ J/kg}$$

Stupanj djelovanja komore miješanja:

$$\eta_M = \frac{\varphi_2^2 \varphi_3^2}{1 + S} = 0,41$$

Difuzor

$$h_{5s}(p_5, s_4) = 2668750 \text{ J/kg}$$

Entalpija na izlazu iz difuzora:

$$h_5 = \frac{h_1 + Sh_3}{1 + S} = 2686405 \text{ J/kg}$$

Stupanj djelovanja difuzora:

$$\eta_D = \varphi_4^2 = 0,88$$

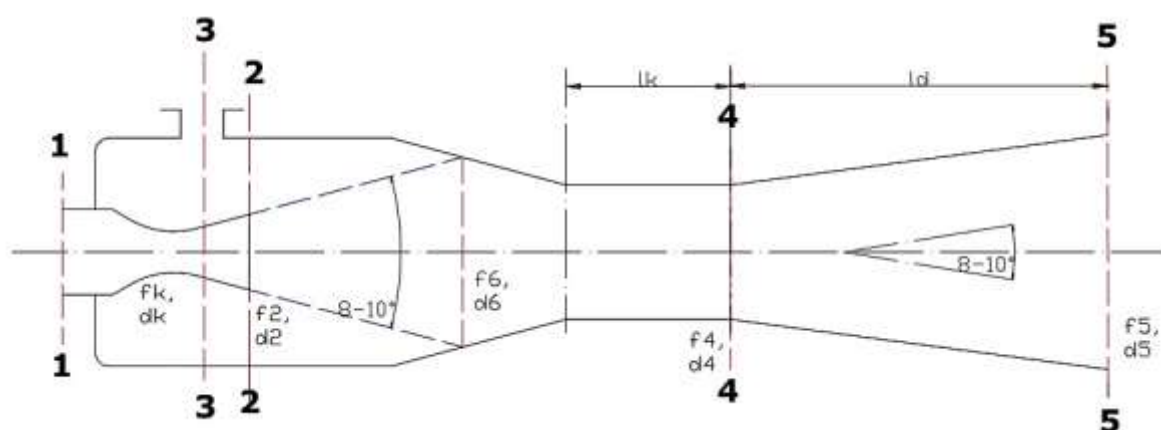
Stupanj upijanja preko izentropskih veličina:

$$S = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \varphi_4 \sqrt{\frac{h_1 - h_{2s}}{h_{5s} - h_4}} - 1 \approx 1$$

Ukupni stupaj djelovanja ejektora:

$$\eta = \eta_L \eta_M \eta_D = 0,32$$

Konstrukcija ejektora



Slika 19. Skica ejektora

Kritični presjek mlaznice:

$$p_1 = 61162 \text{ kp/m}^2$$

$$v_1 = 0,31557 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$c_{kr} = 2,09 \text{ za pregrijanu paru}$$

$$q_{md} = 0,0727 \text{ kg/s}$$

$$f_{kr} = \frac{q_{md}}{c_{kr} \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}} = 8,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$d_{kr} = \sqrt{\frac{4f_{kr}}{\pi}} = 10 \text{ mm}$$

Izlazni otvor mlaznice:

$$w_2 = 968 \text{ m/s}$$

$$v_2 = 6,6554 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$f_2 = \frac{q_{md} v_2}{w_2} = 4,998 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4f_2}{\pi}} = 26 \text{ mm}$$

Presjek mješališta:

$$w_4 = 436 \text{ m/s}$$

$$v_4 = 7,6311 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$q_{md} = q_{mw} = 0,0727 \text{ kg/s}$$

$$f_4 = \frac{(q_{md} + q_{mw}) v_4}{w_4} = 2,6341 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$d_4 = \sqrt{\frac{4f_4}{\pi}} = 58 \text{ mm}$$

Odabran promjer $d'_4 = 72,1 \text{ mm}$.

Korekcija brzine w_4 :

$$w_4 = \frac{(q_{md} + q_{mw})v_4}{\frac{d'_4{}^2 \pi}{4}} = 272 \text{ m/s}$$

$$l_k = 8d'_4 = 577 \text{ mm}$$

Izlazni otvor difuzora:

$$w_5 = 20 \text{ m/s}$$

$$v_5 = 1,695 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$f_5 = \frac{(q_{md} + q_{mw})v_5}{w_5} = 1,2316 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$d_5 = \sqrt{\frac{4f_5}{\pi}} = 125 \text{ mm}$$

$$\text{Odabran } d_5 = 250 \text{ mm}$$

$$l_d = 7(d_5 - d_4) \approx 1200 \text{ mm}$$

Fiktivni promjer d_6 :

$$d_6 = 1,55d_2(1 + S) = 80 \text{ mm}$$

6.6. Termodinamički proračun kondenzatora

Tijek proračuna je iterativan. Odabire se broj i promjer cijevi s kojima se računa promjer cijevne stijenke D_v , koeficijent prolaza topline te površina izmjene topline. Iz dobivene površine izmjene topline računa se duljina plašta L koja s promjerom cijevne stijenke mora zadovoljiti uvjet $L/D_v = 3 \div 7$. U suprotnom odabire se drugi broj ili promjer cijevi. Za izračun koeficijenta prolaza topline potrebno je izračunati koeficijent prijelaza topline na vanjskoj i unutarnjoj strani prema navedenim izrazima.

6.6.1. Bilanca kondenzatora

Iz bilance kondenzatora, izjednačavanjem toplinskog toka neiskorištene supare koji se predaje rashladnoj vodi prilikom kondenzacije supare, dobiven je maseni protok rashladne vode.

$\vartheta_{rv,u} = 15^{\circ}\text{C}$ – ulazna temp. rashladne vode

$\vartheta_{rv,i} = 25^{\circ}\text{C}$ – izlazna temp. rashladne vode

$$\phi_k = \phi_{rv} = \phi_{wR} \quad (1)$$

$$\phi_{wR} = q_{mwR}(h_w - h_{kw}) \quad (2)$$

$$\phi_{wR} = \frac{238,2}{3600} (2611 - 234,42) = 156,5 \text{ kW}$$

$$\phi_{rv} = q_{mrv} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{rv,i} - \vartheta_{rv,u}) \quad (3)$$

Izjednačavanjem (2) i (3) se zatim dobije maseni protok rashladne vode:

$$q_{mrv} = q_{mwR} \frac{h_w - h_{kw}}{c_w \cdot (\vartheta_{rv,i} - \vartheta_{rv,u})}$$

$$q_{mrv} = 238,2 \cdot \frac{2611 - 234,42}{4,107 \cdot (25 - 15)}$$

$$q_{mrv} = 3,82 \text{ kg/s} = 13784 \text{ kg/h}$$

PRIMAR: supara $q_{m1} = q_{mwR} = 0,0662 \text{ kg/s}$

SEKUNDAR: voda $q_{m2} = q_{mrv} = 3,82 \text{ kg/s}$

6.6.2. Svojstva sudionika

PRIMAR – supara u plaštu

Temperatura zasićenja supare: $\vartheta_1 = 62^\circ\text{C}$

Srednja temperatura kondenzata:

$\vartheta_s = 50,58^\circ\text{C}$ – temperatura stjenke ϑ_s je nepoznata pa se proračun vrši iterativno pretpostavljajući temperaturu stjenke da se poklope stacionarni toplinski tokovi na određenom mjestu.

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_s + \vartheta_1}{2} = \frac{50,58 + 62}{2} \approx 57^\circ\text{C}$$

Svojstva kondenzata za 57°C :

ρ_1	985,61 kg/m ³
λ_1	0,65436 W/mK
μ_1	0,00046638 Pa · s

SEKUNDAR – rashladna voda u cijevima

Srednja temperatura:

$$\vartheta_{s2} = \frac{25 + 15}{2} = 20^\circ\text{C}$$

Svojstva vode za 20°C :

ρ_2	998,2 kg/m ³
c_{p2}	4,1851 kJ/(kgK)
λ_2	0,60715 W/(mK)
μ_2	0,00089011 Pa · s
Pr_2	6,1313

6.6.3. Odabir cijevi

Odabrano za sekundar:

Čelična bešavna cijev W.Nr. 1.4301

Ø 28 x 1 mm

6.6.4. Broj cijevi

Pretpostavljena brzina strujanja vode: $w_{rv} = 0,8 \text{ m/s}$

Površina poprečnog presjeka cijevi:

$$A = \frac{q_{mrv}}{\rho_2 \cdot w_{rv}} = \frac{3,82}{998,2 \cdot 0,8} = 0,0047836 \text{ m}^2$$

Broj cijevi u jednom prolazu:

$$n = \frac{4 \cdot A}{d_u^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 0,0047836}{0,020^2 \cdot \pi} \cong 16 \text{ cijevi}$$

Konstruktivska odluka: kondenzator s dva prolaska sekundara i 32 cijevi.

Ukupan broj cijevi:

$$n_{uk} = 2 \cdot 16 = 32 \text{ cijevi}$$

6.6.5. Promjer cijevne stjenke

Geometrijski faktor za trokutasti raspored $f_1 = 1,1$

Faktor za broj prolaza $f_2 = 22 \text{ mm}$ (za 2 prolaza)

Razmak cijevi kod trokutastog rasporeda: $t = 1,3d_v = 28,6 \text{ mm}$

Ukupan broj cijevi: $z = 32$

Promjer plašta:

Outer tube limit [7]:

$$OTL = \sqrt{f_1 \cdot t^2 \cdot z + f_2 \cdot \sqrt{z} \cdot t} + d_v$$

$$OTL = \sqrt{1,1 \cdot 28,6^2 \cdot 32 + 22 \cdot \sqrt{32} \cdot 28,6 + 22} = 201,9 \text{ mm}$$

Kriterij za odabir plašta izmjenjivača: $D_u > OTL$

Izabrana čelična bešavna cijev $\varnothing 219,1 \times 4 \text{ mm}$

Tablice iz kojih su uzeti faktori kao i računanje OTL nalaze se u VDI Heat Atlasu [7].

6.6.6. Koeficijent prijelaza topline na strani vode

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{\rho_2 \cdot w_{rv} \cdot d_u}{\eta_2} = \frac{998,2 \cdot 0,8 \cdot 0,02}{0,00089011} = 17943$$

Nusseltova značajka [8]:

$$Nu_2 = 0,0395 \cdot Re_2^{0,75} \cdot Pr_2^{\frac{1}{3}} = 0,0395 \cdot 17943^{0,75} \cdot 6,1313^{\frac{1}{3}} = 112$$

Za $10^4 < Re_2 < 5 \cdot 10^4$ (Colburn)

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_u = \frac{Nu \cdot \lambda_2}{d_u} = \frac{112 \cdot 0,60715}{0,02} = 3400 \text{ W/m}^2\text{K}$$

6.6.7. Koeficijent prijelaza topline na strani supare

$$\Delta h = h_{pp} - h_{vk} = 2616681 - 251154 = 2365527 \text{ J/kg}$$

Temperatura stjenke ϑ_s dobivena je iterativnim postupkom pomoću programa Excel.

Korišten izraz prema Nusseltu [2]:

$$\alpha_v = \frac{4}{3} \sqrt[4]{\frac{g \cdot \rho_1^2 \cdot \lambda_1^3 \cdot \Delta h}{4 \cdot \eta_1 \cdot (\vartheta - \vartheta_s) \cdot H}} = \frac{4}{3} \sqrt[4]{\frac{9,81 \cdot 985,61^2 \cdot 0,65436^3 \cdot 2365527}{4 \cdot 0,00046638 \cdot (62 - 50,58) \cdot 1,27}} = 4837 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Zbog utjecaja nekondenzirajućih plinova koeficijent prijelaza topline α_v iz iskustvenih se razloga smanjuje za 40%.

$$\alpha_v = 2902 \text{ W/m}^2\text{K}$$

6.6.8. Koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu cijevi

Korišten izraz [2]:

$$k_v = \frac{1}{\frac{d_v}{d_u \cdot \alpha_u} + \frac{r_v}{\lambda_c} \ln \frac{d_v}{d_u} + \frac{1}{\alpha_v}} = \frac{1}{\frac{0,022}{0,02 \cdot 3400} + \frac{0,011}{14} \ln \frac{0,022}{0,02} + \frac{1}{2902}} = 1346 \text{ W/m}^2\text{K}$$

6.6.9. Površina izmjene topline

Srednja logaritamska temperatura:

$$\Delta \vartheta_m = \frac{\Delta \vartheta_1 - \Delta \vartheta_2}{\ln \frac{\Delta \vartheta_1}{\Delta \vartheta_2}} = \frac{(62 - 15) - (62 - 25)}{\ln \frac{(62 - 15)}{(62 - 25)}} = 41,8 \text{ }^\circ\text{C}$$

Površina za izmjenu topline:

$$A = \frac{\Phi}{k_v \cdot \Delta \vartheta_m} = \frac{156500}{1346 \cdot 41,8} = 2,8 \text{ m}^2$$

Duljina plašta:

$$L = \frac{A}{d_v \cdot \pi \cdot n_c} = \frac{2,8}{0,022 \cdot \pi \cdot 32} = 1,27 \text{ m}$$

$$\frac{L}{D_v} = \frac{1,27}{0,2191} = 5,8$$

Uvjet L/D_v od 3 do 7 , zadovoljen.

7. PRORAČUN ČVRSTOĆE

Korištene norme:

HRN M.E2.250	Proračun dijelova pod tlakom
HRN M.E2.252	Podnice izvrgnute unutarnjem ili vanjskom tlaku
HRN M.E2.253	Cilindrični plaštev i kugle izvrgnuti unutarnjem tlaku
HRN M.E2.254	Cilindrični plaštev izvrgnuti vanjskom tlaku
HRN M.E2.256	Izrezi u cilindrima, konusima i kuglama
HRN M.E2.257	Proračun vijaka
HRN M.E2.258	Proračun priрубnica
HRN M.E2.259	Cijevne stjenke i ravne podnice

Standardni elementi odabrani su iz tehničkog priručnika IPIM [11].

HIDROSTATSKI ISPITNI TLAK

Materijal: W.Nr. 1.4301

$$R_{p1,0/100} = 190 \text{ N/mm}^2 \quad [10]$$

$$R_{m/100} = 450 \text{ N/mm}^2 \quad [10]$$

Proračunska čvrstoća za austenitni čelik:

$$f = \max \left[\left(\frac{R_{p1,0/100}}{S} \right); \min \left(\frac{R_{p1,0/100}}{1,2}; \frac{R_{m/100}}{3} \right) \right] =$$

$$f = \max \left[\left(\frac{190}{1,5} \right); \min \left(\frac{190}{1,2}; \frac{450}{3} \right) \right] = \frac{450}{3} = 150 \text{ N/mm}^2$$

7.1. Proračun čvrstoće uparivača

7.1.1. Proračun cilindričnog plašta

Plašt izložen djelovanju unutrašnjeg tlaka:

Parametri:

K/S	150 N/mm ² – proračunska čvrstoća
D_s	600 mm – vanjski promjer plašta
D_u	592 mm – unutarnji promjer plašta
s_A	4 mm – debljina stjenke plašta (pretpostavljeno)
p	1 bar – proračunski tlak – posude pod vakuumom
ν	1 - koeficijent valjanosti zavarenog spoja
c_1	0,3 - dozvoljeno odstupanje mjera
c_2	1 – dodatak zbog korozije
s_s	debljina stjenke cijevnog priključka

Proračun debljine stjenke:

$$\frac{D_s}{D_u} \leq 1,2 \quad \text{uvjet primjene}$$

$$\frac{D_s}{D_u} = \frac{600}{592} = 1.01 \quad \text{uvjet zadovoljava}$$

Minimalna potrebna debljina stjenke pri radnom tlaku:

$$s = \frac{D_s \cdot p}{20 \cdot \frac{K}{S} \cdot \nu + p} + c_1 + c_2 = \frac{592 \cdot 1}{20 \cdot 150 \cdot 1 + 1} + 0,3 + 1 = 1,5 \text{ mm}$$

$$s = 1.5 < 4 \text{ mm} \quad \text{uvjet zadovoljen}$$

Odabrana čelična šavna cijev $\varnothing 600 \times 4$

Plast izložen djelovanju vanjskog tlaka:

Parametri:

D_s	600 mm – vanjski promjer plašta
D_u	592 mm – unutarnji promjer plašta
s_A	4 mm – debljina stijenke plašta (pretpostavljeno)
p	1 bar – proračunski tlak – posude pod vakuumom
v	1 - koeficijent valjanosti zavarenog spoja
c_1	0,3 - dozvoljeno odstupanje mjera
c_2	1 – dodatak zbog korozije
S_k	3 - sigurnosni stupanj u odnosu na elastično ulubljenje
l	3000 mm - duljina cilindra između djelotvornih ojačanja
u	1,5% – odstupanje od kružnog oblika
v	1- koeficijent valjanosti zavarenog spoja

Za djelovanje vanjskog tlaka sigurnost se povećava 20% pa je $K/S = 125 \text{ N/mm}^2$

Tlak pri elastičnom ulubljivanju:

$$\frac{D_s}{l} = \frac{600}{3000} = 0,2$$

$$\frac{D_s}{100 \cdot (s_e - c_1 - c_2)} = \frac{600}{100 \cdot (4 - 0,3 - 1)} = 1,88$$

Očitano iz dijagrama dotične norme:

$$\frac{p \cdot S_k}{E} \cdot 10^5 = 1,6$$

$$p = 1,12 \text{ bar} > 1 \text{ bar}$$

Uvjet stijenke prema elastičnom ulubljenju zadovoljava.

Tlak pri plastičnom ulubljenju:

$$\frac{D_s}{l} = \frac{600}{3000} = 0,2$$

$$\frac{D_s}{100 \cdot (s_e - c_1 - c_2)} = \frac{600}{100 \cdot (4 - 0,3 - 1)} = 1,88$$

Očitano iz dijagrama dotične norme:

$$\frac{10 \cdot p \cdot S}{K} = 0,2$$

$$p = 2,9 \text{ bar} > 1 \text{ bar}$$

Uvjet stjenke za plastično ulubljivanje zadovoljava.

7.1.2. Proračun priključaka na plaštu

Ulaz ogrjevnice pare na parnom domu:

$q_{m1} = 0,1454 \text{ kg/s}$ – maseni protok pare

$w_{1u} = 30 \text{ m/s}$ – pretpostavljena brzina strujanja pare na ulazu

$\rho_{1u} = 0,13041 \text{ kg/m}^3$ – gustoća pare

Unutarnji promjer priključka:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m1}}{\rho_{1u} \cdot \pi \cdot w_{1u}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,1454}{0,13041 \cdot \pi \cdot 30}} = 0,0214 \text{ m} = 21,4 \text{ mm}$$

Odabrana čelična bešavna cijev $\varnothing 219,1 \times 3$

Izlaz kondenzata:

$w_{1i} = 0,8 \text{ m/s}$ – pretpostavljena brzina strujanja kapljevine na izlazu

$\rho_{1i} = 983,19 \text{ kg/m}^3$ – gustoća kapljevine

Unutarnji promjer priključka:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m1}}{\rho_{1i} \cdot \pi \cdot w_{1i}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,1454}{983,19 \cdot \pi \cdot 0,8}} = 0,0152 \text{ m} = 15,2 \text{ mm}$$

Odabrana čelična bešavna cijev $\varnothing 60,3 \times 2$ mm

7.1.3. Proračun podnice

Proračun podnice s izrezima:

Parametri:

D_s	600 mm – vanjski promjer podnice
s_e	4 mm – pretpostavljena debljina stijenke podnice
p_1	1 bar – proračunski tlak
R	$D_s = 600$ mm – radijus kalote
r	$0,1D_s = 60$ mm – radijus torusnog dijela
h_1	$3,5s_e = 55$ mm - visina cilindričnog dijela
h_2	$0,1935D_s - 0,455s_e = 115$ mm
c_1	0,3 - dozvoljeno odstupanje mjera
c_2	1 – dodatak zbog korozije
v	1 - koeficijent valjanosti zavarenog spoja

Odabrana plitka podnica $\varnothing 600 \times 4$

$$0,001 \leq \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} \leq 0,1 \quad \text{uvjet primjene}$$

$$\frac{4 - 0,3 - 1}{600} = 0,0045 \quad \text{uvjet zadovoljen}$$

Koeficijent oblika podnice:

Izrezi unutar $0,6D_s$ - ne uzima se u obzir proračunski koeficijent β oslabljenja nastala zbog izreza. Računa se koeficijent oslabljenja izrezom v_A (HRN M.E2.256)

Koeficijent oslabljenja izrezom:

$$v_A = f \left(\frac{s_s - c_1 - c_2}{s_A - c_1 - c_2}, \frac{d_{pu}}{\sqrt{(D_{u(kugle)} + s_A - c_1 - c_2) \cdot (s_A - c_1 - c_2)}} \right)$$

Odnos debljine:

$$\frac{s_s - c_1 - c_2}{s_A - c_1 - c_2} = \frac{2 - 0,3 - 1}{4 - 0,3 - 1} = 0,26$$

$$\frac{d_{pu}}{\sqrt{(D_{u(kugle)} + s_A - c_1 - c_2) \cdot (s_A - c_1 - c_2)}} =$$

$$\frac{123}{\sqrt{(600 \cdot 2 + 4 - 0,3 - 1) \cdot (4 - 0,3 - 1)}} = 2,2$$

$v_A = 0,48$ – očitano iz dijagrama dotične norme prema prethodim parametrima

Za djelovanje vanjskog tlaka sigurnost se povećava 20% pa je $K/S = 125 \text{ N/mm}^2$

Potrebna debljina stjenke:

$$s = \frac{D_s \cdot p}{40 \cdot \frac{K}{S} \cdot v_A + p} + c_1 + c_2 = \frac{600 \cdot 1}{40 \cdot 125 \cdot 0,48 + 1} + 0,3 + 1 = 1,55 \text{ mm}$$

$$s = 1,55 < s_e = 4 \text{ mm} \quad \text{uvjet zadovoljen}$$

Usvojena debljina jednodijelne podnice $s_e = 4 \text{ mm}$ za slučaj izreza unutar $0,6D_s$.

Elastično ulubljivanje:

$$p_B \geq 1,5 \cdot p = 1,5 \cdot 1 = 1,5 \text{ bar} \quad \text{- tlak ulubljivanja}$$

$$\frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} = \frac{4 - 0,3 - 1}{600} = 0,0045$$

$$\frac{p_B}{E} \cdot 10^5 = 8$$

$$p_B = 210\,000 \cdot 8 \cdot 10^{-5} = 16,8 \text{ bar}$$

$$p_B = 16,8 > 1,5 \text{ bar} \quad \text{uvjet zadovoljen}$$

Usvojena debljina jednodijelne podnice $s_e = 4 \text{ mm}$.

7.1.4. Proračun priključka ulaza otopine

Gustoća soka od rajčice prema Choi-Okos relacijama:

$\vartheta = 45^{\circ}\text{C}$ – srednja temperatura otopine

$$\rho_w = 9,9989 \cdot 10^2 - 6,0334 \cdot 10^{-2} \cdot \vartheta - 3,6710 \cdot 10^{-3} \cdot \vartheta^2 = 991,6 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_s = 1,4693 \cdot 10^3 + 5,4667 \cdot 10^{-1} \cdot \vartheta - 6,9643 \cdot 10^{-3} \cdot \vartheta^2 = 1480 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho = \rho_w \cdot (1 - \xi_x) + \rho_s \cdot \xi_x = 991,6 \cdot (1 - 0,085) + 1480 \cdot 0,085 = 1033,5 \text{ kg/m}^3$$

ρ_w – gustoća povezana s vodenim udjelom

ρ_s – gustoća povezana s udjelom rajčice

ρ – gustoća otopine

Pretpostavljena brzina otopine $w = 1,5 \text{ m/s}$

$$d_{pu} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{mr}}{\pi \cdot w \cdot \rho}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,166}{\pi \cdot 1,5 \cdot 1033,5}} = 116,7 \text{ mm}$$

Odabrana je čelična bešavna cijev $\varnothing 127 \times 2$.

7.1.5. Proračun cijevne stjenke

Parametri:

p	1 bar
s_A	20 mm - pretpostavljena debljina cijevne stjenke
S	1,5 – stupanj sigurnosti
L	3 m - duljina plašta
d_v	34mm - vanjski promjer cijevi
d_u	32 mm – unutarnji promjer cijevi
t	42,5 mm - korak između cijevi
C	0.45
E	210 000 N/mm ² – modul elastičnosti
α	0,0000141 1/K – koeficijent linearne dilatacije
ΔT	10 °C – najveća temperaturna razlika
l_0	2,96 m – slobodna duljina izvijanja
l_k	$0,5 \cdot l_0 = 1,48 \text{ m}$ – dozvoljena duljina izvijanja
D_u	592 mm – unutarnji promjer plašta

Debljina cijevne stijenke:

$$\nu = \frac{t - d_u}{t} = \frac{42,5 - 32}{42,5} = 0,25$$

$$s = C \cdot \sqrt{\frac{(D_u^2 - n \cdot d_u^2) \cdot p \cdot S}{\nu \cdot 10 \cdot K}} = 0,3 \cdot \sqrt{\frac{(592^2 - 127 \cdot 32^2) \cdot 1}{0,25 \cdot 10 \cdot 150}} = 7,3 \text{ mm}$$

$s = 20 \text{ mm}$ – odabrano

Odabrana debljina stijenke 20 mm.

Uvaljane cijevi:

Duljina uvaljavanja: $l_w = 20 \text{ mm}$

Korisna površina nastavka:

$$A_w = (d_v - d_u) \cdot l_w = (34 - 32) \cdot 20 = 40 \text{ mm}^2$$

Maksimalna korisna površina nastavka:

$$A_{\max} = 0,1 \cdot d_v \cdot l_w = 0,1 \cdot 34 \cdot 20 = 68 \text{ mm}^2$$

Površina opterećenja koja se odnosi na jednu cijev:

$$A_R = 4 \cdot \frac{t^2}{2} - \frac{d_v^2 \cdot \pi}{4} = 4 \cdot \frac{42,5^2}{2} - \frac{34^2 \cdot \pi}{4} = 2705 \text{ mm}^2 = 0,002705 \text{ m}^2$$

Sila tlaka u cijevi:

$$F_R = A_R \cdot p = 0,002705 \cdot 100000 = 270,5 \text{ N}$$

Naprezanje u spoju zbog sile tlaka:

$$\sigma_R = \frac{F_R}{A_{\max}} = \frac{270,5}{68} = 3,98 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Naprezanje zbog temperaturne dilatacije:

$$\sigma_T = E \cdot \alpha \cdot \Delta T = 210\,000 \cdot 0,0000141 \cdot 10 = 29,6 \text{ N/mm}^2$$

Sila zbog temperaturne dilatacije:

$$F_T = \sigma_T \cdot A = 29,6 \cdot \frac{(34^2 - 32^2) \cdot \pi}{4} = 3070 \text{ N}$$

Ukupna sila u spoju:

$$F_{UK} = F_R + F_T = 3341 \text{ N}$$

Ukupno naprezanje u spoju:

$$\sigma_{UK} = \sigma_R + \sigma_T = 33,6 \text{ N/mm}^2$$

Dopušteno naprezanje ravnog valjnog spoja:

$$\sigma_{dop} = 150 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} > \sigma_{UK} = 33,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Spoj uvaljavanjem zadovoljava.

Provjera na izvijanje:

Stupanj vitkosti:

$$\lambda = \frac{4 \cdot l_k}{\sqrt{d_v^2 + d_u^2}} = \frac{4 \cdot 1480}{\sqrt{34^2 + 32^2}} = 127$$

$$\lambda_0 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{K}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{210\,000}{450}} = 68$$

za $\lambda > \lambda_0$:

$$I = \frac{(d_v^4 - d_u^4) \cdot \pi}{64} = \frac{(34^4 - 32^4) \cdot \pi}{64} = 14125 \text{ mm}^4$$

$$F_K = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l_k^2 \cdot 3} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 14125}{1480^2 \cdot 3} = 4455 \text{ N}$$

$$F_{UK} = 3341 \text{ N} < F_K = 4455 \text{ N} - \text{zadovoljava}$$

7.1.6. Proračun izreza na plaštu

Glavni cilindrični plašt:

Uvjet primjene:

$$0,002 \leq \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} \leq 0,1$$

$$\frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} = \frac{4 - 0,4 - 1}{600} = 0,0043$$

Potrebna debljina stijenke oko najvećeg izreza:

$$\frac{s_s - c_1 - c_2}{s_A - c_1 - c_2} = \frac{2,3 - 0,4 - 1}{4 - 0,4 - 1} = 0,346$$

$$\frac{d_u}{\sqrt{(D_u + s_A - c_1 - c_2) \cdot (s_A - c_1 - c_2)}} = \frac{56,3}{\sqrt{(600 + 4 - 0,4 - 1) \cdot (4 - 0,4 - 1)}} = 1,42$$

$v_A = 0,6$ – očitano iz dijagrama dotične norme prema prethodim parametrima

$$s_A = \frac{D_s \cdot p}{20 \cdot \frac{K}{S} \cdot v + p} + c_1 + c_2 = \frac{600 \cdot 1}{20 \cdot 150 \cdot 0,6 + 1} + 0,4 + 1 = 1,73 \text{ mm}$$

$s_A = 1,73 \text{ mm} \leq s_e = 4 \text{ mm}$ – ojačanje nije potrebno

Parni dom s priključkom ogrjevnice pare:

Uvjet primjene:

$$0,002 \leq \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} \leq 0,1$$

$$\frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} = \frac{4 - 0,4 - 1}{800} = 0,00375$$

Potrebna debljina stijenke oko najvećeg izreza:

$$\frac{s_s - c_1 - c_2}{s_A - c_1 - c_2} = \frac{3 - 0,4 - 1}{4 - 0,4 - 1} = 0,62$$

$$\frac{d_u}{\sqrt{(D_u + s_A - c_1 - c_2) \cdot (s_A - c_1 - c_2)}} = \frac{213,1}{\sqrt{(800 + 4 - 0,4 - 1) \cdot (4 - 0,4 - 1)}} = 4,66$$

$v_A = 0,38$ – očitano iz dijagrama dotične norme prema prethodim parametrima

$$s_A = \frac{D_s \cdot p}{20 \cdot \frac{K}{S} \cdot v + p} + c_1 + c_2 = \frac{800 \cdot 1}{20 \cdot 150 \cdot 0,38 + 1} + 0,4 + 1 = 2,1 \text{ mm}$$

$s_A = 2,1 \text{ mm} \leq s_e = 4 \text{ mm}$ – ojačanje nije potrebno

7.2. Proračun čvrstoće separatora

7.2.1. Proračun cilindričnog plašta

Plašt izložen djelovanju unutrašnjeg tlaka:

$q_{mw} = 0,1388 \text{ kg/s}$ – maseni protok supare

$w_{1u} = 1,5 \text{ m/s}$ – pretpostavljena brzina strujanja pare kroz plašt

$\rho_{1u} = 0,13041 \text{ kg/m}^3$ – gustoća supare

Unutarnji promjer priključka:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{mw}}{\rho_{1u} \cdot \pi \cdot w_{1u}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,1388}{0,13041 \cdot \pi \cdot 1,5}} = 951 \text{ mm}$$

Odabrana čelična šavna cijev $\varnothing 1000 \times 4 \text{ mm}$

Parametri:

K/S	150 N/mm ²
D_s	1000 mm – vanjski promjer plašta
D_u	992 mm – unutarnji promjer plašta
s_A	4 mm – debljina stjenke plašta (pretpostavljeno)
p	1 bar – proračunski tlak – posude pod vakuumom
ν	1 - koeficijent valjanosti zavarenog spoja
c_1	0,3 - dozvoljeno odstupanje mjera
c_2	1 – dodatak zbog korozije
s_s	debljina stjenke cijevnog priključka

Proračun debljine stjenke:

$$\frac{D_s}{D_u} \leq 1,2 \quad \text{uvjet primjene}$$

$$\frac{D_s}{D_u} = \frac{1000}{992} = 1,01 \quad \text{uvjet zadovoljava}$$

Minimalna potrebna debljina stjenke pri radnom tlaku:

$$s = \frac{D_s \cdot p}{20 \cdot \frac{K}{S} \cdot \nu + p} + c_1 + c_2 = \frac{1000 \cdot 1}{20 \cdot 150 \cdot 1 + 1} + 0,3 + 1 = 1,63 \text{ mm}$$

$$s = 1,63 < 4 \text{ mm} \quad \text{uvjet zadovoljen}$$

Odabrana debljina stjenke: $s = 4 \text{ mm}$

Plast izložen djelovanju vanjskog tlaka:

Parametri:

D_s	1000 mm – vanjski promjer plašta
D_u	992 mm – unutarnji promjer plašta
s_A	4 mm – debljina stjenke plašta (pretpostavljeno)
p	1 bar – proračunski tlak – posude pod vakuumom
v	1 - koeficijent valjanosti zavarenog spoja
c_1	0,3 - dozvoljeno odstupanje mjera
c_2	1 – dodatak zbog korozije
S_k	3 - sigurnosni stupanj u odnosu na elastično ulubljenje
l	1500 mm - duljina cilindra između djelotvornih ojačanja
u	1,5% – odstupanje od kružnog oblika
v	1- koeficijent valjanosti zavarenog spoja

Za djelovanje vanjskog tlaka sigurnost se povećava 20% pa je $K/S = 125 \text{ N/mm}^2$

Tlak pri elastičnom ulubljivanju:

$$\frac{D_s}{l} = \frac{1000}{1500} = 0,68$$

$$\frac{D_s}{100 \cdot (s_e - c_1 - c_2)} = \frac{1000}{100 \cdot (4 - 0,3 - 1)} = 3,7$$

Očitano iz dijagrama dotične norme:

$$\frac{p \cdot S_k}{E} \cdot 10^5 = 0,7$$

$$p = 0,5 \text{ bar} < 1 \text{ bar}$$

Uvjet stjenke prema elastičnom ulubljenju nije zadovoljen te je odabrano ojačanje na plaštu.

Tlak pri plastičnom ulubljenju:

$$\frac{D_s}{l} = \frac{1000}{1500} = 0,68$$

$$\frac{D_s}{100 \cdot (s_e - c_1 - c_2)} = \frac{1000}{100 \cdot (4 - 0,3 - 1)} = 3,7$$

Očitano iz dijagrama dotične norme:

$$\frac{10 \cdot p \cdot S}{K} = 0,08$$

$$p = 1,2 \text{ bar} > 1 \text{ bar}$$

Uvjet stjenke za plastično ulubljivanje zadovoljava.

7.2.2. Proračun podnice

Proračun podnice s izrezima:

Parametri:

D_s	1000 mm – vanjski promjer podnice
s_e	4 mm – pretpostavljena debljina stjenke podnice
p_1	1 bar – proračunski tlak
R	$D_s = 1000 \text{ mm}$ – radijus kalote
r	$0,1D_s = 100 \text{ mm}$ – radijus torusnog dijela
h_1	$3,5s_e = 35 \text{ mm}$ - visina cilindričnog dijela
h_2	$0,1935D_s - 0,455s_e = 200 \text{ mm}$
c_1	0,3 - dozvoljeno odstupanje mjera
c_2	1 – dodatak zbog korozije
v	1 - koeficijent valjanosti zavarenog spoja

Odabrana plitka podnica $\varnothing 1000 \times 4$

$$0,001 \leq \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} \leq 0,1 \quad \text{uvjet primjene}$$

$$\frac{4 - 0,3 - 1}{1000} = 0,00266 \quad \text{uvjet zadovoljen}$$

Gornja podnica:

Koeficijent oblika podnice:

Izrezi unutar $0.6D_s$ - ne uzima se u obzir proračunski koeficijent β oslabljenja nastala zbog izreza. Računa se koeficijent oslabljenja izrezom v_A (HRN M.E2.256)

Koeficijent oslabljenja izrezom:

Uvjet primjene:

$$0,002 \leq \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} \leq 0,1$$

$$\frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} = \frac{4 - 0,3 - 1}{1000} = 0,0027 \text{ uvjet zadovoljen}$$

$$v_A = f \left(\frac{s_s - c_1 - c_2}{s_A - c_1 - c_2}, \frac{d_{pu}}{\sqrt{(D_{u(kugle)} + s_A - c_1 - c_2) \cdot (s_A - c_1 - c_2)}} \right)$$

Odnos debljine:

$$\frac{s_s - c_1 - c_2}{s_A - c_1 - c_2} = \frac{3 - 0,3 - 1}{4 - 0,3 - 1} = 0,63$$

$$\frac{d_{pu}}{\sqrt{(D_{u(kugle)} + s_A - c_1 - c_2) \cdot (s_A - c_1 - c_2)}} =$$

$$\frac{244,5}{\sqrt{(1000 \cdot 2 + 4 - 0,3 - 1) \cdot (4 - 0,3 - 1)}} = 3,3$$

$v_A = 0,48$ – očitano iz dijagrama dotične norme prema prethodnim parametrima

Za djelovanje vanjskog tlaka sigurnost se povećava 20% pa je $K/S = 125 \text{ N/mm}^2$

Potrebna debljina stjenke:

$$s = \frac{D_s \cdot p}{40 \cdot \frac{K}{S} \cdot v_A + p} + c_1 + c_2 = \frac{1000 \cdot 1}{40 \cdot 125 \cdot 0,48 + 1} + 0,3 + 1 = 1,72 \text{ mm}$$

$$s = 1,72 < s_e = 4 \text{ mm} \quad \text{uvjet zadovoljen}$$

Usvojena debljina jednodijelne podnice $s_e = 4 \text{ mm}$ za slučaj izreza unutar $0,6D_s$.

Elastično ulubljivanje:

$$p_B \geq 1,5 \cdot p = 1,5 \cdot 1 = 1,5 \text{ bar} \quad - \text{ tlak ulubljivanja}$$

$$\frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} = \frac{4 - 0,3 - 1}{1000} = 0,0027$$

$$\frac{p_B}{E} \cdot 10^5 = 8$$

$$p_B = 210\,000 \cdot 8 \cdot 10^{-5} = 16,8 \text{ bar}$$

$$p_B = 16,8 > 1,5 \text{ bar} \quad \text{uvjet zadovoljen}$$

Usvojena debljina jednodijelne podnice $s_e = 4 \text{ mm}$.

Invertirana donja podnica:

Izrezi izvan $0,6D_s$ – uzima se u obzir koeficijent oblika podnice β

Koeficijent oblika podnice:

$$\beta = \beta \left(\frac{d_u}{D_s} ; \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} \right)$$

$$\frac{d_u}{D_s} = \frac{123}{1000} = 0,123$$

$$\frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} = \frac{4 - 0,3 - 1}{1000} = 0,0027$$

$$\beta = 4 \quad \text{Očitano iz dijagrama dotične norme za plitku podnicu (slika 7.)}$$

Potrebna debljina stjenke:

$$s = \frac{D_s \cdot p \cdot \beta}{40 \cdot \frac{K}{S} \cdot v} + c_1 + c_2 = \frac{1000 \cdot 1 \cdot 4}{40 \cdot 125 \cdot 1} + 0,3 + 1 = 2 \text{ mm}$$

$$s = 2 < s_e = 4 \text{ mm} \quad \text{uvjet zadovoljen}$$

Usvojena debljina jednodijelne podnice $s_e = 4 \text{ mm}$ za slučaj izreza izvan $0,6D_s$.

7.2.3. Proračun priključka izlaska koncentrata

Gustoća soka od rajčice prema Choi-Okos relacijama:

$\vartheta = 60^{\circ}\text{C}$ – temperatura otopine

$$\rho_w = 9,9989 \cdot 10^2 - 6,0334 \cdot 10^{-2} \cdot \vartheta - 3,6710 \cdot 10^{-3} \cdot \vartheta^2 = 983,1 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_s = 1,4693 \cdot 10^3 + 5,4667 \cdot 10^{-1} \cdot \vartheta - 6,9643 \cdot 10^{-3} \cdot \vartheta^2 = 1477 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho = \rho_w \cdot (1 - \xi_a) + \rho_s \cdot \xi_a = 983,1 \cdot (1 - 0,3) + 1477 \cdot 0,3 = 1131,3 \text{ kg/m}^3$$

ρ_w – gustoća povezana s vodenim udjelom

ρ_s – gustoća povezana s udjelom rajčice

ρ – gustoća otopine

Pretpostavljena brzina $w = 1,5 \text{ m/s}$

$$d_{pu} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{ma}}{\pi \cdot w \cdot \rho}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0277}{\pi \cdot 1,5 \cdot 1131,3}} = 4,6 \text{ mm}$$

Odabran je priključak koji odgovara priključku ulaska otopine u uparivač.

$\varnothing 127 \times 2 \text{ mm}$

7.2.4. Proračun priključka izlaska supare

$q_{mw} = 0,1388 \text{ kg/s}$ – maseni protok supare

$w_{1u} = 30 \text{ m/s}$ – pretpostavljena brzina strujanja pare na ulazu

$\rho_{1u} = 0,13041 \text{ kg/m}^3$ – gustoća supare

Unutarnji promjer priključka:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{mw}}{\rho_{1u} \cdot \pi \cdot w_{1u}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,1388}{0,13041 \cdot \pi \cdot 30}} = 213 \text{ mm}$$

Odabrana čelična bešavna cijev $\varnothing 244,5 \times 3 \text{ mm}$

7.3. Proračun čvrstoće kondenzatora

7.3.1. Proračun cilindričnog plašta

Plašt izloženog djelovanju unutrašnjeg tlaka:

Parametri:

K/S	150 N/mm ²
D_s	219,1 mm – vanjski promjer plašta
D_u	211,1 mm – unutarnji promjer plašta
s_A	4 mm – debljina stjenke plašta (pretpostavljeno)
p	1 bar – proračunski tlak – posude pod vakuumom
v	1 - koeficijent valjanosti zavarenog spoja
c_1	0,3 - dozvoljeno odstupanje mjera
c_2	1 – dodatak zbog korozije
s_s	debljina stjenke cijevnog priključka

Proračun debljine stjenke:

$$\frac{D_s}{D_u} \leq 1,2 \quad \text{uvjet primjene}$$

$$\frac{D_s}{D_u} = \frac{219,1}{211,1} = 1,04 \quad \text{uvjet zadovoljava}$$

Minimalna potrebna debljina stjenke pri radnom tlaku:

$$s = \frac{D_s \cdot p}{20 \cdot \frac{K}{S} \cdot v + p} + c_1 + c_2 = \frac{219,1 \cdot 1}{20 \cdot 150 \cdot 1 + 1} + 0,3 + 1 = 1,37 \text{ mm}$$

$$s = 1,37 < 4 \text{ mm} \quad \text{uvjet zadovoljen}$$

Odabrana čelična bešavna cijev Ø 219,1 x 4

Plast izložen djelovanju vanjskog tlaka:

Parametri:

D_s	323,9 mm – vanjski promjer plašta
D_u	315,9 mm – unutarnji promjer plašta
s_A	4 mm – debljina stijenke plašta (pretpostavljeno)
p	1 bar – proračunski tlak – posude pod vakuumom
v	1 - koeficijent valjanosti zavarenog spoja
c_1	0,3 - dozvoljeno odstupanje mjera
c_2	1 – dodatak zbog korozije
S_k	3 - sigurnosni stupanj u odnosu na elastično ulubljenje
l	1270 mm - duljina cilindra između djelotvornih ojačanja
u	1,5% – odstupanje od kružnog oblika
v	1- koeficijent valjanosti zavarenog spoja

Za djelovanje vanjskog tlaka sigurnost se povećava 20% pa je $K/S = 125 \text{ N/mm}^2$

Tlak pri elastičnom ulubljivanju:

$$\frac{D_s}{l} = \frac{219,1}{1270} = 0,173$$

$$\frac{D_s}{100 \cdot (s_e - c_1 - c_2)} = \frac{219,1}{100 \cdot (4 - 0,3 - 1)} = 0,81$$

Očitano iz dijagrama dotične norme:

$$\frac{p \cdot S_k}{E} \cdot 10^5 = 8$$

$$p = 5,6 \text{ bar} > 1 \text{ bar}$$

Uvjet stijenke prema elastičnom ulubljenju zadovoljava.

Tlak pri plastičnom ulubljenju:

$$\frac{D_s}{l} = \frac{219,1}{1270} = 0,172$$

$$\frac{D_s}{100 \cdot (s_e - c_1 - c_2)} = \frac{219,1}{100 \cdot (4 - 0,3 - 1)} = 0,81$$

Očitano iz dijagrama dotične norme:

$$\frac{10 \cdot p \cdot S}{K} = 0,9$$

$$p = 11,3 \text{ bar} > 1 \text{ bar}$$

Uvjet stjenke za plastično ulubljivanje zadovoljava.

7.3.2. Proračun priključaka na plaštu

Ulaz vodene pare:

$q_{mR} = 0,0662 \text{ kg/s}$ – maseni protok pare

$w_{1u} = 30 \text{ m/s}$ – pretpostavljena brzina strujanja pare na ulazu

$\rho_{1u} = 0,13041 \text{ kg/m}^3$ – gustoća pare

Unutarnji promjer priključka:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{mR}}{\rho_{1u} \cdot \pi \cdot w_{1u}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0662}{0,13041 \cdot \pi \cdot 30}} = 0,147 \text{ m}$$

Odabrana čelična bešavna cijev $\varnothing 168,3 \times 3 \text{ mm}$

Izlaz kondenzata:

$w_{1i} = 0,8 \text{ m/s}$ – pretpostavljena brzina strujanja kapljevine na izlazu

$\rho_{1i} = 985,61 \text{ kg/m}^3$ – gustoća kapljevine

Unutarnji promjer priključka:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{mR}}{\rho_{1i} \cdot \pi \cdot w_{1i}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0662}{985,61 \cdot \pi \cdot 0,8}} = 0,0103 \text{ m}$$

Odabrana čelična bešavna cijev $\varnothing 38 \times 2,6 \text{ mm}$

7.3.3. Proračun podnice

Materijal: W.Nr. 1.4301

Parametri:

D_s	219,1 mm – vanjski promjer podnice
s_e	4 mm – pretpostavljena debljina stjenke podnice
p_1	1 bar – proračunski tlak
R	$D_s = 219,1$ mm – radijus kalote
r	$0,1D_s = 22$ mm – radijus torusnog dijela
h_1	$3,5s_e = 14$ mm - visina cilindričnog dijela
h_2	$0,1935D_s - 0,455s_e = 41$ mm
c_1	0,3 - dozvoljeno odstupanje mjera
c_2	1 – dodatak zbog korozije
v	1 - koeficijent valjanosti zavarenog spoja

Odabrana plitka podnica $\varnothing 219,1 \times 4$

$$0,001 \leq \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} \leq 0,1 \quad \text{uvjet primjene}$$

$$\frac{4 - 0,3 - 1}{219,1} = 0,014 \quad \text{uvjet zadovoljen}$$

Koeficijent oblika podnice:

$$\beta = \beta \left(\frac{d_u}{D_s} ; \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} \right)$$

$$\frac{d_u}{D_s} = 0 \quad \text{nema izreza}$$

$$\beta = 2,9 \quad \text{Očitano iz dijagrama dotične norme}$$

Potrebna debljina stijenke torusnog dijela podnice za radni tlak:

$$s = \frac{D_s \cdot p \cdot \beta}{40 \cdot \frac{K}{S} \cdot v} + c_1 + c_2 = \frac{219,1 \cdot 1 \cdot 2,9}{40 \cdot 150 \cdot 1} + 0,3 + 1 = 1,41 \text{ mm}$$

$$s = 1,41 < s_e = 4 \text{ mm} \quad \text{uvjet zadovoljen}$$

Potrebna debljina stijenke kalote za radni tlak:

$$s = \frac{2 \cdot (R + s_e) \cdot p}{40 \cdot \frac{K}{S} \cdot v + p} + c_1 + c_2 = \frac{2 \cdot (219,1 + 4) \cdot 1}{40 \cdot 150 \cdot 1 + 1} + 0,3 + 1 = 1,37 \text{ mm}$$

$$s = 1,37 < s_e = 4 \text{ mm} \quad \text{uvjet zadovoljen}$$

Elastično ulubljivanje:

$$p_B \geq 1,5 \cdot p = 1,5 \cdot 1 = 1,5 \text{ bar} \quad - \text{ tlak ulubljivanja}$$

$$\frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} = \frac{4 - 0,3 - 1}{219,1} = 0,0123$$

$$\frac{p_B}{E} \cdot 10^5 = 8$$

$$p_B = 210\,000 \cdot 8 \cdot 10^{-5} = 16,8 \text{ bar}$$

$$p_B = 16,8 > 1,5 \text{ bar} \quad \text{uvjet zadovoljen}$$

Usvojena debljina jednodijelne podnice $s_e = 4 \text{ mm}$.

7.3.4. Proračun priključka rashladne vode

Pretpostavljena brzina vode $w = 1,5 \text{ m/s}$

$$d_{pu} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{mrV}}{\pi \cdot w \cdot \rho_2}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,81}{\pi \cdot 1,5 \cdot 998,2}} = 56,9 \text{ mm}$$

Odabrana je čelična bešavna cijev $\varnothing 60,3 \times 2,9$

7.1.5. Proračun vijaka

Materijal vijka: čelik za vijke, razred čvrstoće 5,8

Materijal brtve: It Klingerit

Parametri:

b_d	10 mm - korisna širina brtve
d_D	240 mm - srednji promjer brtve
d_u	219,1 mm - unutarnji promjer prirubnice
p	1 bar - proračunski tlak
$K=R_{p\ 0.2}$	400 N/mm ² - proračunska čvrstoća vijka (5,6)
S_D	1,2 - sigurnost vijka
$k_1 = b_d$	10 mm - koeficijent klingerit brtve za radno stanje
n	8 – broj vijaka

Najmanja sila u vijcima za:

RADNO STANJE:

Sila uslijed djelovanja tlaka na gornju površinu:

$$F_{RB} = \frac{p \cdot \pi \cdot d_u^2}{40} = \frac{1 \cdot \pi \cdot 219,1^2}{40} = 3770 \text{ N}$$

Sila koja djeluje na prsten koji nije pokriven brtvom:

$$F_{FB} = \frac{p \cdot \pi \cdot (d_D^2 - d_u^2)}{40} = \frac{1 \cdot \pi \cdot (240^2 - 219,1^2)}{40} = 754 \text{ N}$$

Sila u brtvi:

$$F_{DB} = \frac{p}{10} \cdot \pi \cdot d_D \cdot S_D \cdot k_1 = \frac{1}{10} \cdot \pi \cdot 240 \cdot 1,2 \cdot 10 = 905 \text{ N}$$

Najmanja sila u vijcima za radno stanje:

$$F_{SB} = F_{RB} + F_{FB} + F_{DB} = 5429 \text{ N}$$

ISPITNO STANJE:

$$F_{RBi} = 1,3 \cdot F_{RB} = 4901 \text{ N}$$

$$F_{FBi} = 1,3 \cdot F_{FB} = 980 \text{ N}$$

$$F_{DBi} = 1,3 \cdot F_{DB} = 1177 \text{ N}$$

$$F_{SBi} = F_{RBi} + F_{FBi} + F_{DBi} = 7058 \text{ N}$$

UGRADNO STANJE:

Najmanja sila u vijcima:

$$\text{koeficijent } k_0 \cdot K_D = 15 \cdot b_D = 15 \cdot 10 = 150 \text{ N/mm}$$

Dopušteno opterećenje brtvi:

$$F_{DV} = \pi \cdot d_D \cdot K_D \cdot k_0 = \pi \cdot 240 \cdot 150 = 113098 \text{ N}$$

Uvjet brtvljenja spoja: $F_{DV} > F_{SB}$

pa vrijedi:

$$\begin{aligned} F_{DV} &= 0,2 \cdot F_{DV} + 0,8 \cdot \sqrt{F_{SB} \cdot F_{DV}} = \\ &= 0,2 \cdot 113098 + 0,8 \cdot \sqrt{7058 \cdot 113098} = 45222 \text{ N} \end{aligned}$$

Proračun promjera vijka:

RADNO STANJE:

$$d_k = Z \cdot \sqrt{\frac{F_{SB}}{K_{20} \cdot n}} + c_5 \text{ - promjer jezgre navoja}$$

za radno stanje, $\varphi = 1$, vijci s punim tijelom $Z = 1.51$:

$$Z \cdot \sqrt{\frac{F_{SB}}{K_{20} \cdot n}} = 1,51 \cdot \sqrt{\frac{5429}{400 \cdot 8}} = 2 \leq 20 \text{ mm}$$

iz toga slijedi:

$$c_5 = 3 \text{ mm}$$

$$d_k = 2 + 3 = 5$$

ISPITNO STANJE:

za ispitno stanje, $\varphi = 1$, vijci s punim tijelom $Z = 1,29$:

$$d_k = Z \cdot \sqrt{\frac{F_{Sbi}}{K_{20} \cdot n}} = 1,29 \cdot \sqrt{\frac{7058}{400 \cdot 8}} = 1,9 \text{ mm}$$

UGRADNO STANJE:

za ugradno stanje, $\varphi = 1$, vijci s punim tijelom $Z = 1,29$:

$$d_k = Z \cdot \sqrt{\frac{F_{DV}}{K_{20} \cdot n}} = 1,29 \cdot \sqrt{\frac{45222}{400 \cdot 8}} = 4,9 \text{ mm}$$

Odabrani vijci M16 razreda čvrstoće 5,6 prema normi ISO 4016.

7.3.6. Proračun ravne prirubnice za privarivanje

Parametri:

d_2	219,1 mm - unutarnji promjer prirubnice
d_s	320 mm - vanjski promjer prirubnice
d_D	240mm - srednji promjer brtve
d_t	280 mm - promjer kruga rupa
d_u	211,1 mm – unutarnji promjer cilindričnog dijela podnice
s_1	4 mm - debljina stijenke podnice
p	1 bar - radni tlak
d_L	18 mm - promjer rupa za vijke
d'_L	$18 \cdot v = 18 \cdot 0,65 = 11,7$ mm - umanjeni promjer rupa
v	0,65 – faktor umanjenja promjera rupa za vijke

Korisna dvostruka širina prirubnice:

$$b = d_s - d_2 - 2 \cdot d'_L = 320 - 219,1 - 2 \cdot 11,7 = 77,5 \text{ mm}$$

Pomoćna vrijednost:

$$Z = (d_u + s_1) \cdot s_1^2 = (211,1 + 4) \cdot 4^2 = 3442 \text{ mm}^3$$

Krak djelovanja sile u vijku za:

radno i ispitno stanje:

$$a = \frac{d_t - d_u - s_1}{2} = \frac{280 - 211,1 - 4}{2} = 32,45 \text{ mm}$$

za ugradbeno stanje:

$$a_D = \frac{d_t - d_d}{2} = \frac{280 - 240}{2} = 20 \text{ mm}$$

Određivanje momenta otpora prirubnice:

RADNO STANJE:

$$W = \frac{F_{SB} \cdot S}{K} \cdot a = \frac{5429}{150} \cdot 32,45 = 1175 \text{ mm}^3$$

ISPITNO STANJE:

$$W = \frac{F_{\text{SBi}} \cdot S}{K} \cdot a = \frac{7058}{150} \cdot 32,45 = 1527 \text{ mm}^3$$

UGRADNO STANJE:

$$W = \frac{F_{\text{DV}} \cdot S}{K} \cdot a_{\text{D}} = \frac{45222}{150} \cdot 20 = 6030 \text{ mm}^3$$

Potrebna visina prirubnice:

$$h_{\text{f}} = \sqrt{\frac{1,42 \cdot W - Z}{b}} = \sqrt{\frac{1,42 \cdot 6030 - 3442}{77,5}} = 8 \text{ mm}$$

Odabrana visina prirubnice $h_{\text{f}} = 20$.

7.3.7. Proračun cijevne stjenke

Parametri:

p	2 bar
s_{A}	20 mm - pretpostavljena debljina cijevne stjenke
L	1,27 m - duljina plašta
d_{v}	22 mm - vanjski promjer cijevi
d_{u}	20 mm – unutarnji promjer cijevi
t	28,6 mm - korak između cijevi
C	0,45
E	210 000 N/mm ² – modul elastičnosti
α	0,0000141 1/K – koeficijent linearne dilatacije
ΔT	45 °C – najveća temperaturna razlika
l_0	1,27 m – slobodna duljina izvijanja
l_{k}	0,5 · l_0 = 0,635 m – dozvoljena duljina izvijanja
D_{u}	219,1 mm – unutarnji promjer plašta

Debljina cijevne stjenke:

$$v = \frac{t - d_{\text{u}}}{t} = \frac{28,6 - 20}{28,6} = 0,3$$

$$s = C \cdot \sqrt{\frac{(D_u^2 - n \cdot d_u^2) \cdot p \cdot S}{v \cdot 10 \cdot K}} = 0,3 \cdot \sqrt{\frac{(219,1^2 - 32 \cdot 20^2) \cdot 2}{0,26 \cdot 10 \cdot 150}} = 4 \text{ mm}$$

$s = 20 \text{ mm}$ – odabrano

Odabrana debljina stjenke 20 mm iz konstrukcijskih razloga (VDI Heat Atlas 12-20 mm preporuka)

Uvaljane cijevi:

Duljina uvaljavanja: $l_w = 20 \text{ mm}$

Korisna površina nastavka:

$$A_w = (d_v - d_u) \cdot l_w = (22 - 20) \cdot 20 = 40 \text{ mm}^2$$

Maksimalna korisna površina nastavka:

$$A_{\max} = 0,1 \cdot d_v \cdot l_w = 0,1 \cdot 22 \cdot 20 = 44 \text{ mm}^2$$

Površina opterećenja koja se odnosi na jednu cijev:

$$A_R = 4 \cdot \frac{t^2}{2} - \frac{d_v^2 \cdot \pi}{4} = 4 \cdot \frac{28,6^2}{2} - \frac{22^2 \cdot \pi}{4} = 1256 \text{ mm}^2 = 0,001256 \text{ m}^2$$

Sila tlaka u cijevi:

$$F_R = A_R \cdot p = 0,001256 \cdot 200000 = 251 \text{ N}$$

Naprezanje u spoju zbog sile tlaka:

$$\sigma_R = \frac{F_R}{A_{\max}} = \frac{251}{44} = 5,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Naprezanje zbog temperaturne dilatacije:

$$\sigma_T = E \cdot \alpha \cdot \Delta T = 210\,000 \cdot 0,00001 \cdot 45 = 94,5 \text{ N/mm}^2$$

Sila zbog temperaturne dilatacije:

$$F_T = \sigma_T \cdot A = 94,5 \cdot \frac{(22^2 - 20^2) \cdot \pi}{4} = 6235 \text{ N}$$

Ukupna sila u spoju:

$$F_{UK} = F_R + F_T = 251 + 6235 = 6486 \text{ N}$$

Ukupno naprezanje u spoju:

$$\sigma_{UK} = \sigma_R + \sigma_T = 5,7 + 94,5 = 100,2 \text{ N/mm}^2$$

Dopušteno naprezanje ravnog valjnog spoja:

$$\sigma_{dop} = 150 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} > \sigma_{UK} = 100,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Spoj uvaljavanjem zadovoljava.

Provjera na izvijanje:

Stupanj vitkosti:

$$\lambda = \frac{4 \cdot l_k}{\sqrt{d_v^2 + d_u^2}} = \frac{4 \cdot 635}{\sqrt{22^2 + 20^2}} = 85,4$$

$$\lambda_0 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{K}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{210\,000}{450}} = 68$$

za $\lambda > \lambda_0$:

$$I = \frac{(d_v^4 - d_u^4) \cdot \pi}{64} = \frac{(22^4 - 20^4) \cdot \pi}{64} = 3645 \text{ mm}^4$$

$$F_K = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l_k^2 \cdot 3} = \frac{\pi^2 \cdot 210\,000 \cdot 3645}{635^2 \cdot 3} = 56207 \text{ N}$$

$F_{UK} = 6486 \text{ N} < F_K = 56207 \text{ N}$ – zadovoljava

7.3.8. Proračun izreza na plaštu

Izrez za priključak kondenzata:

$$0,002 \leq \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} \leq 0,1 \quad \text{uvjet primjene}$$

$$\frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} = \frac{4 - 0,4 - 1}{219,1} = 0,0119$$

Potrebna debljina stjenke oko najvećeg izreza:

$$\frac{s_s - c_1 - c_2}{s_A - c_1 - c_2} = \frac{2,6 - 0,4 - 1}{4 - 0,4 - 1} = 0,462$$

$$\frac{d_u}{\sqrt{(D_u + s_A - c_1 - c_2) \cdot (s_A - c_1 - c_2)}} = \frac{32,8}{\sqrt{(219,1 + 4 - 0,4 - 1) \cdot (4 - 0,4 - 1)}} = 1,37$$

$v_A = 0,63$ – očitano iz dijagrama dotične norme prema prethodim parametrima

$$s_A = \frac{D_s \cdot p}{20 \cdot \frac{K}{S} \cdot v + p} + c_1 + c_2 = \frac{219,1 \cdot 1}{20 \cdot 150 \cdot 0,63 + 1} + 0,4 + 1 = 1,52 \text{ mm}$$

$s_A = 1,52 \text{ mm} \leq s_e = 4 \text{ mm}$ – ojačanje nije potrebno

Izrez za priključak supare:

$$0,002 \leq \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} \leq 0,1 \quad \text{uvjet primjene}$$

$$\frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} = \frac{4 - 0,4 - 1}{219,1} = 0,0119$$

Potrebna debljina stjenke oko najvećeg izreza:

$$\frac{s_s - c_1 - c_2}{s_A - c_1 - c_2} = \frac{3 - 0,4 - 1}{4 - 0,4 - 1} = 0,615$$

$$\frac{d_u}{\sqrt{(D_u + s_A - c_1 - c_2) \cdot (s_A - c_1 - c_2)}} =$$
$$\frac{162,3}{\sqrt{(219,1 + 4 - 0,4 - 1) \cdot (4 - 0,4 - 1)}} = 6,8$$

$v_A = 0,3$ – očitano iz dijagrama dotične norme prema prethodim parametrima

$$s_A = \frac{D_s \cdot p}{20 \cdot \frac{K}{S} \cdot v + p} + c_1 + c_2 = \frac{219,1 \cdot 1}{20 \cdot 150 \cdot 0,3 + 1} + 0,4 + 1 = 1,64 \text{ mm}$$

$s_A = 1,64 \text{ mm} \leq s_e = 4 \text{ mm}$ – ojačanje nije potrebno

8. PRORAČUN PADA TLAKA

Za proračun pada tlaka korištena je literatura [16].

8.1. Pad tlaka uparivača na tlačnoj strani

$$\Delta p_t = \Delta p_{pr} + \Delta p_{cs} + \Delta p_c$$

Δp_{pr} - pad tlaka u priključcima

Δp_{cs} - pad tlaka na ulazu i izlazu iz cijevnog snopa (uključujući broj prolaza)

Δp_c - pad tlaka uslijed strujanja kroz cijevi

Pad tlaka u priključcima:

$\xi_u = 0,5$ - koeficijent otpora na ulazu u priključak

$\xi_i = 1$ - koeficijent otpora na izlazu iz priključka

$$\Delta p_{pr} = (\xi_u + \xi_i) \cdot \frac{\rho \cdot w_{pr}^2}{2} = (0,5 + 1) \cdot \frac{1033,5 \cdot 1,5^2}{2} = 1744 \text{ Pa}$$

Pad tlaka na ulazu i izlazu iz cijevnog snopa:

$\xi_u = 0,5$ - koeficijent otpora na ulazu u cijevni snop

$\xi_i = 1$ - koeficijent otpora na izlazu iz cijevnog snopa $\xi_i = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \sim 1$

$$\Delta p_{cs} = n \cdot \xi \cdot \frac{\rho \cdot w_{cs}^2}{2} = 2 \cdot (0,5 + 1) \cdot \frac{1033,5 \cdot 0,5^2}{2} = 388 \text{ Pa}$$

Pad tlaka uslijed strujanja kroz cijevi:

Reynoldsova značajka za ne-Newtonovski fluid:

$$Re = \frac{\rho \cdot 8 \cdot w_s^{2-n} \cdot r^n}{K \cdot \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n} = \frac{1033,5 \cdot 8 \cdot 1^{2-0,47} \cdot 0,016^{0,47}}{0,37 \cdot \left(\frac{3 \cdot 0,47 + 1}{0,47}\right)^{0,47}} = 1484$$

$$K = 0,37 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$$

$$n = 0,47$$

K, n - eksperimentalne konstante za zadanu koncentraciju i temperaturu [13]

Pad tlaka za izobraženo laminarno strujanje ne-Newtonovskog fluida:

$$\Delta p_c = \frac{L \cdot \rho \cdot w_c^2 \cdot 2 \cdot (16/Re)}{d_u} = \frac{3 \cdot 1033,5 \cdot 1^2 \cdot 2 \cdot (16/1484)}{0,032} = 2089 \text{ Pa}$$

Pad tlaka uslijed visine:

$$\Delta p_H = \rho \cdot g \cdot H = 1033,5 \cdot 9,81 \cdot 3 = 30416 \text{ Pa}$$

Ukupni pad tlaka na tlačnoj strani:

$$\Delta p_t = \Delta p_{pr} + \Delta p_{cs} + \Delta p_c + \Delta p_H = 1744 + 388 + 2089 + 30416 = 34637 \text{ Pa} = 0,35 \text{ bar}$$

8.2. Pad tlaka uparivača na usisnoj straniPad tlaka uslijed cijevnih lukova:

$$\Delta p_l = n \cdot \xi \cdot \frac{\rho \cdot w_{cs}^2}{2} = 2 \cdot 0,2 \cdot \frac{1033,5 \cdot 1,5^2}{2} = 465 \text{ Pa}$$

Pad tlaka uslijed strujanja u povratnom cjevovodu:

Reynoldsova značajka ne-Newtonovskog fluida:

$$Re = \frac{\rho \cdot 8 \cdot w_s^{2-n} \cdot r^n}{K \cdot \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n} = \frac{1033,5 \cdot 8 \cdot 1,5^{2-0,43} \cdot 0,0615^{0,43}}{11,7 \cdot \left(\frac{3 \cdot 0,43 + 1}{0,43}\right)^{0,43}} = 196$$

$$K = 11,7 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$$

$$n = 0,43$$

K, n - eksperimentalne konstante za zadanu koncentraciju i temperaturu [13]

Pad tlaka za izobraženo laminarno strujanje ne-Newtonovskog fluida

$$\Delta p_c = \frac{L \cdot \rho \cdot w_c^2 \cdot 2 \cdot (16/Re)}{d_u} = \frac{3 \cdot 1033,5 \cdot 1,5^2 \cdot 2 \cdot (16/196)}{0,123} = 9260 \text{ Pa}$$

Pad tlaka uslijed visine:

Namjerno se zanemaruje radi sigurnosti kako bi se dobila veća snaga pumpe.

Pad tlaka na ulazu u cjevovod:

$\xi_u = 0,5$ - koeficijent otpora na ulazu u priključak cijevi

$$\Delta p_{cs} = \xi_u \cdot \frac{\rho \cdot w_{cs}^2}{2} = 0,5 \cdot \frac{1033,5 \cdot 1,5^2}{2} = 581 \text{ Pa}$$

Ukupni pad tlaka na usisnoj strani:

$$\Delta p_u = \Delta p_c - \Delta p_{cs} - \Delta p_l = 9260 - 581 - 465 = 8214 \text{ Pa} = 0,08214 \text{ bar}$$

8.3. Odabir pumpe

Medij: sok od rajčice

Svojstva medija:

$$\vartheta = 30^{\circ}\text{C}$$

$$\rho(30^{\circ}\text{C}) = 1036 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu(30^{\circ}\text{C}) = 0,00079735 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Duljina cijevnog snopa i brzina kroz cijevni snop:

$$l_c = 3 \text{ m}$$

$$w_c = 1 \text{ m/s}$$

Visina dobave pumpe:

$$H = \frac{\Delta p_t - \Delta p_u}{\rho \cdot g} = \frac{34637 - 8214}{1036 \cdot 9,81} = 2,6 \text{ m}$$

Volumni protok:

$$q_V = \frac{d_u^2 \cdot \pi}{4} \cdot w \cdot n_c = \frac{0,032^2 \cdot \pi}{4} \cdot 1 \cdot 127 = 0,102 \text{ m}^3/\text{s}$$

Snaga pumpe:

$$P_p = \frac{q_V \cdot (\Delta p_t - \Delta p_u)}{\eta} = \frac{0,102 \cdot (34637 - 8214)}{0,9} = 2995 \text{ W} = 3 \text{ kW}$$

ZAKLJUČAK

U sklopu diplomskog rada projektirana je jednostupanjska uparivačka stanica s prisilnom cirkulacijom za ugušćivanje soka od rajčice s mlaznim ejektorom i vertikalnim shell&tube kondenzatorom. Dan je pregled vrsta uparivača, opisan je sam proces i rad uparivačke stanice i njenih komponenti. Opisan je proces isparivanja, dvofaznog toka te je objašnjena problematika određivanja prijelaza topline isparivanjem u struji kapljevine.

Prikazana je usporedba triju modela za izračun koeficijenta prijelaza topline u uparivačkim cijevima: Shah, Gungor-Winterton i model iz VDI Heat Atlas-a. U ovom radu korišten je model Gungor-Winterton koji uzima u obzir koeficijent prijelaza topline za konvektivno i mjehurasto isparivanje te daje vrijednosti koje su najbliže vrijednostima korištenim u praksi.

Proračunom čvrstoće glavnih dijelova stanice zadovoljeni su svi konstrukcijski zahtjevi, a termodinamičkim proračunom, biranjem pojedinih parametara metodom pokušaj poput broja i promjera cijevi zadovoljeni su zahtjevi izvedbe uparne stanice i vođenja procesa.

LITERATURA

- [1] Minton, P. : Handbook of Evaporation Technology, Noyes Publications USA, 1986.
- [2] Galović, A.: Termodinamika II, FSB Zagreb, 2010.
- [3] GEA Wiegand, Evaporation Technology, 2008.
- [4] Thome, J.: Wolverine Engineering Data Book III, 2010.
- [5] Schneider, D.: Generatori pare, FSB Zagreb, 2015.
- [6] Andrassy, M.: Toplinske operacije, FSB Zagreb, 2013.
- [7] VDI Heat Atlas Second Edition, 2006.
- [8] I. Boras, S. Švaić: Formule za izračunavanje koeficijenata prijelaza topline, FSB Zagreb, 2013.
- [9] Zacharias B. Maroulis, George D. Saravacos: Food process design, Marcel Dekker Inc., 2003.
- [10] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Sajema d.o.o., Zagreb, 2009.
- [11] IPIM.: Tehnički priručnik za procesnu industriju, Zagreb, 1993.
- [12] Gould, W.: Tomato production, processing & technology, Baltimore, 1992.
- [13] Valentas: Food Engineering Practice, New York, 1997.
- [14] M.A., Rao: Engineering Properties of Food, USA, 2005.
- [15] Dak, Verma, Jaaffrey: Rheological Properties of Tomato Concentrate, India, 2008.
- [16] B. Slipčević: Izmjenjivači topline, 1989.

PRILOZI

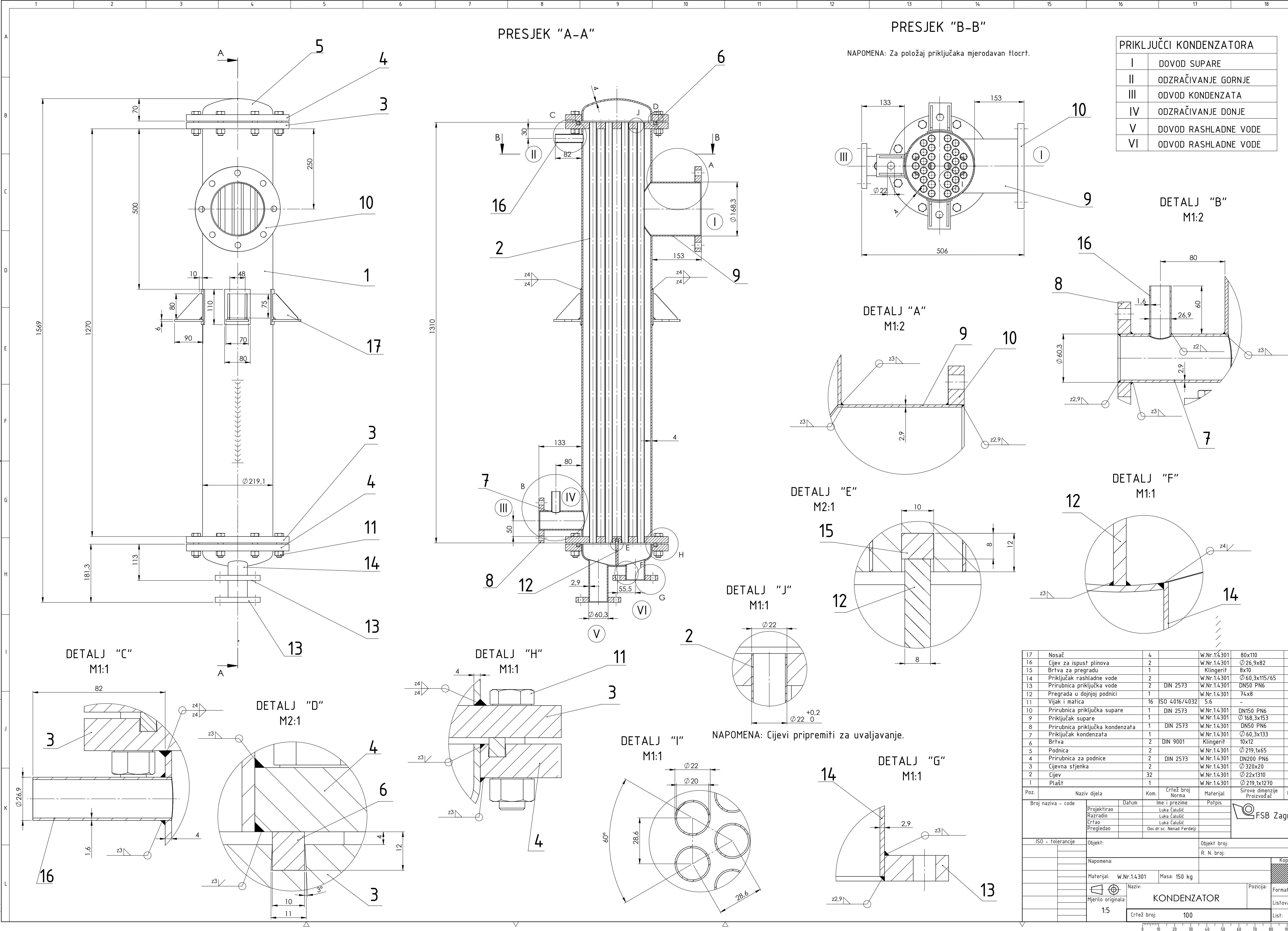
- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE


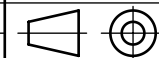
PRILOG NACRTI

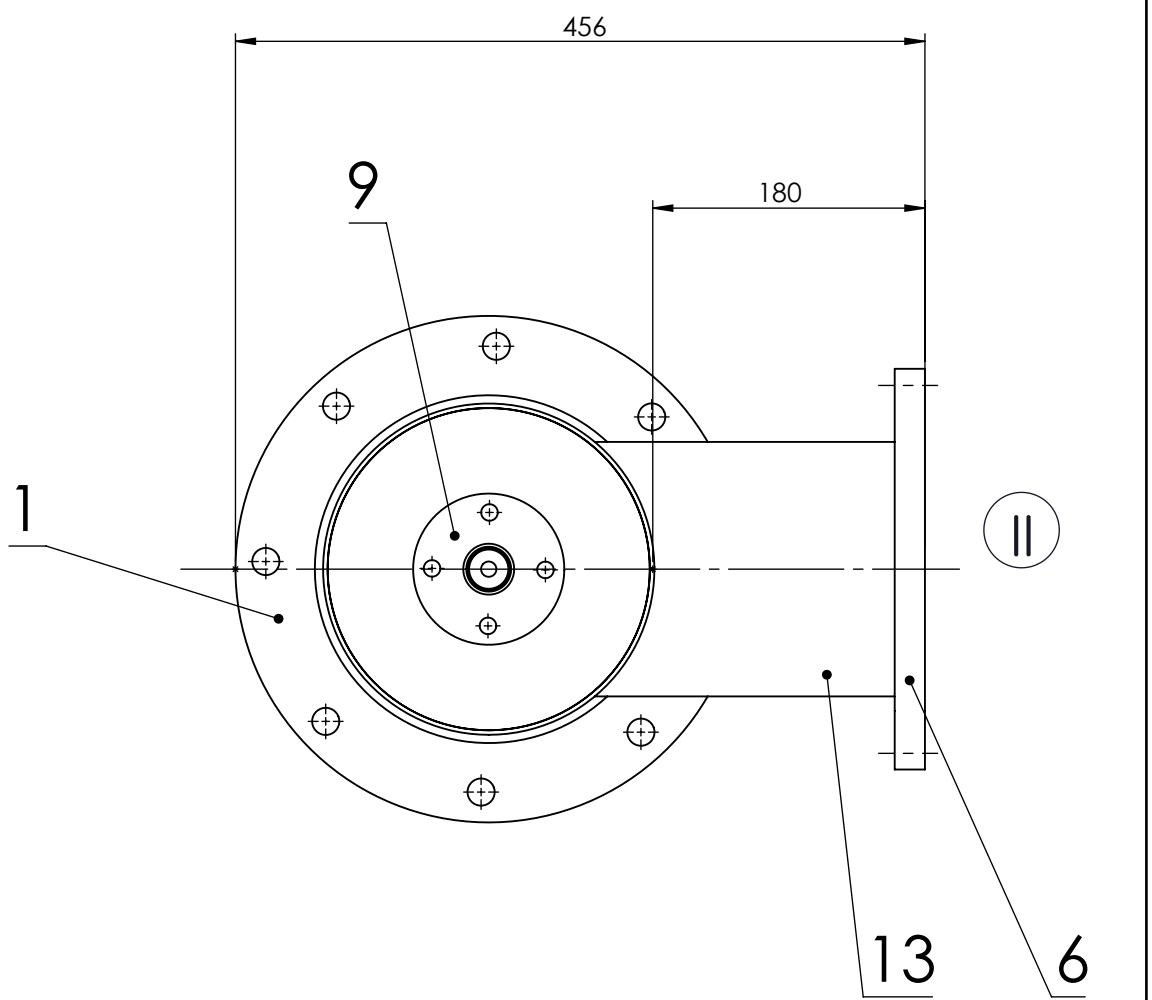
Luka Čalušić

Zagreb, 2017.



PRIKLJUČCI KONDENZATORA	
I	DOVOD SUPARE
II	ODZRAČIVANJE GORNJE
III	ODVOD KONDENZATA
IV	ODZRAČIVANJE DONJE
V	DOVOD RASHLADNE VODE
VI	ODVOD RASHLADNE VODE


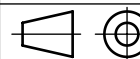
17	Nosač	4		W.Nr.1.4.301	80x110	-	
16	Cijev za ispušt. plinova	2		W.Nr.1.4.301	Ø 26,9x82	0,05	
15	Brtva za pregradu	1		Klingerit	8x10	-	
14	Priključak rashladne vode	2		W.Nr.1.4.301	Ø 60,3x115/65	0,4	
13	Prirubnica priključka vode	2	DIN 2573	W.Nr.1.4.301	DN50 PN6	1,5	
12	Pregrada u donjoj podnici	1		W.Nr.1.4.301	74x8	1,7	
11	Vijak i matica	16	ISO 4016/4032	5.6	-	-	
10	Prirubnica priključka supare	1	DIN 2573	W.Nr.1.4.301	DN150 PN6	4,9	
9	Priključak supare	1		W.Nr.1.4.301	Ø 168,3x153	1,5	
8	Prirubnica priključka kondenzata	1	DIN 2573	W.Nr.1.4.301	DN50 PN6	1,5	
7	Priključak kondenzata	1		W.Nr.1.4.301	Ø 60,3x133	0,3	
6	Brtva	2	DIN 9001	Klingerit	10x12	-	
5	Podnica	2		W.Nr.1.4.301	Ø 219,1x65	4,2	
4	Prirubnica za podnice	2	DIN 2573	W.Nr.1.4.301	DN200 PN6	10	
3	Cijevna stjenka	2		W.Nr.1.4.301	Ø 320x20	18	
2	Cijev	32		W.Nr.1.4.301	Ø 22x1310	0,9	
1	Plašt	1		W.Nr.1.4.301	Ø 219,1x1270	69	
Poz.	Naziv dijela		Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime		Potpis	 FSB Zagreb	
Projektirao			Luka Čalušić				
Razradio			Luka Čalušić				
Crtao			Luka Čalušić				
Pregledao			Doc.dr.sc. Nenad Ferdelji				
ISO - tolerancije		Objekt:			Objekt broj:		
		Napomena:			R. N. broj:		
		Materijal:			W.Nr.1.4.301	Masa: 150 kg	Kopija
		Naziv:			Pozicija:		
Mjerilo originala		KONDENZATOR			Format: A1		
1:5		Crtež broj:			100	Listova:	
						List:	

[illegible]

Technical drawing of a mechanical part, likely a shaft or axle, showing dimensions and features. The drawing includes a central section with a diameter of 26 mm and a length of 152 mm. A smaller section on the right has a diameter of 10 mm and a length of 113.1 mm. The total length is 268.6 mm. The drawing also shows a 1:0.94 taper, a 1:7 taper, and a 4° angle. A 15 mm dimension is shown for a specific feature. The drawing is labeled with 16, 11, 12, and 11.

POPIS PRIKLJUČAKA	
I	ULAZ POGONSKE PARE
II	ULAZ SUPARE
III	IZLAZ PARE

21	Vijak s maticom i podloškom	4	ISO 4014/4032	-	-	-
20	Brtva	1	DIN 2690	Klingerit	19x2	-
19	Prirubnica	1	DIN 2573	W.Nr. 1.4301	DN 65 PN 6	1,9
18	Prirubnica	1	DIN 2636	W.Nr. 1.4301	DN 65 PN 6	2,2
17	Konus	1		W.Nr. 1.4301	Ø84/ Ø76,1 x200	0,4
16	Prirubnica	1		W.Nr. 1.4301	Ø50/ Ø32 x 10	0,09
15	Brtva	1	DIN 2690	Klingerit	14x2	-
14	Uvrtni vijak	4	ISO 4162	-	-	-
13	Priključak ulaska supare	1		W.Nr. 1.4301	Ø168,3 x 180	8,4
12	Cijev	1		W.Nr. 1.4301	Ø32x53	0,01
11	Mlaznica	1		W.Nr. 1.4301	Ø26/ Ø10 x 132	0,4
10	Ploča	1		W.Nr. 1.4301	Ø213,1 x 20	5,4
9	Prirubnica	1	DIN 2576	W.Nr. 1.4301	DN 25 PN 10	0,9
8	Priključak ulaska pogonske pare	1		W.Nr. 1.4301	Ø33,7 x 200	0,3
7	Prirubnica	1	DIN 2576	W.Nr. 1.4301	DN 25 PN 10	0,7
6	Prirubnica	1	DIN 2573	W.Nr. 1.4301	DN 150 PN 6	4,9
5	Plast	1		W.Nr. 1.4301	Ø219,1 x 453	8,4
4	Konus	1		W.Nr. 1.4301	Ø219,1/ Ø84 x 66,7	0,9
3	Cijev	1		W.Nr. 1.4301	Ø70 x 560	1,9
2	Konus	1		W.Nr. 1.4301	Ø230/ Ø70 x 1046	7,4
1	Prirubnica	1		W.Nr. 1.4301	Ø335 x 22	7

Poz.	Naziv dijela		Kom.	Crtež broj	Materijal	Sirove dimenzije	Masa
Broj naziva - code			Ime i prezime		Podpis		FSB Zagreb
Projektiarao		Luka Čalušić					
Razradio		Luka Čalušić					
Crtao		Luka Čalušić					
Pregledao		Doc.dr.sc. Nenad Ferdejić					
ISO – tolerancije			Objekt:		Objekt broj:		
					R. N. broj:		
Napomena:							
Materijal:			W.Nr. 1.4301	Masa: 55 kg			
			Naziv:		Pozicija:		Kopija
Mjerilo originala			EJEKTOR				Format: A1
1:5			Crtež broj:		300		Listova:
							List:

